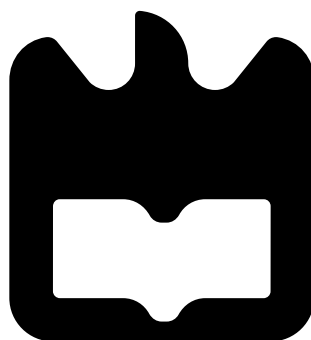




**Ricardo
Penas Conde**

Sistema de Localização Global





**Ricardo
Penas Conde**

Sistema de Localização Global

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor João Nuno Pimentel da Silva Matos, Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e a co-orientação do Doutor Diogo Nuno Pereira Gomes, Professor Auxiliar do mesmo Departamento.

Dedico este trabalho à minha família, e em particular ao meu avô António Ferreira Penas (in memoriam).

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Dr. José Alberto Gouveia Fonseca

Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Dr. Paulo Jorge de Campos Bartolomeu

Diretor Técnico da empresa *Globaltronic - Eletrónica e Telecomunicações, S.A.*

Prof. Dr. João Nuno Pimentel da Silva Matos

Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos / acknowledgements

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família, nomeadamente aos meus pais, irmã, avós e madrinha. Pela confiança, pela presença, pelo incansável apoio, por tudo aquilo que me ensinaram ao longo de todos estes anos e pelo que isso me ajudou a crescer são, e continuarão a ser, o melhor daquilo que sou.

Agradeço aos meus orientadores, os professores João Nuno Matos e Diogo Gomes, pelo apoio prestado ao longo do trabalho e aos professores Ilídio Oliveira e José Maria Fernandes pela cedência de dois aparelhos durante um longo período de tempo. Deixo também uma palavra de apreço ao Hugo Mostardinha, a quem agradeço pela disponibilidade e colaboração nos testes realizados na Câmara Anecoica e na Gaiola de Faraday, e ao Diogo Sotero por toda a ajuda facultada no desenvolvimento da aplicação *web*.

Aos amigos com quem tive a possibilidade de partilhar os seis anos que compuseram o meu percurso académico, e aos que de forma mais presente me acompanharam ao longo deste ano nem sempre fácil e repleto de desafios, o meu muito obrigado.

Palavras-Chave

Android, BLE, *Bluetooth Low Energy*, Localização em tempo real, Localização *indoor*, Redes sem fios, RSSI, *SensorTag*, Sistemas de Localização

Resumo

Os avanços tecnológicos alcançados no último quarto de século possibilitaram um significativo aperfeiçoamento ao nível da localização de pessoas e bens. No entanto, a incapacidade de os sistemas de localização calcularem posições com elevada precisão em ambientes sobretudo interiores é ainda uma limitação bem presente, a qual serve de mote a esta dissertação.

Após o estudo das soluções existentes propõe-se o desenvolvimento e implementação do *Thesis Location System* (TLS), um sistema para localização *indoor* baseado na tecnologia emergente *Bluetooth Low Energy* e assente numa rede de dispositivos sem fios *SensorTag* da *Texas Instruments*, dispostos por um espaço em posições fixas e conhecidas e suportados por uma aplicação *Android*, que funciona como módulo central, e por uma página *web* para fins de configuração, que se encontram interligadas por um servidor externo. A implementação do sistema inclui a aplicação de um método de tratamento dos dados recolhidos, bem como um estudo da propagação do sinal transmitido no meio. Na parte final do documento apresenta-se um conjunto de testes que permitem analisar o desempenho e a precisão do sistema dimensionado, a partir dos quais se retira que mesmo com as limitações evidenciadas, o sistema apresenta uma precisão média de 2.5 metros, que pode nos casos considerados como mais desfavoráveis ultrapassar os cinco metros, com 77% das estimativas (em média) consideradas válidas.

Keywords

Android, BLE, Bluetooth Low Energy, Indoor Location, Positioning Systems, Real-Time Location Systems, RSSI, *SensorTag*, Wireless Networks

Abstract

The technological advances achieved on the last quarter century enabled significant improvements in terms of locating people and property. However, the inability of the present location systems to estimate highly accurate positions, particularly in indoor environments, keeps restricting their use, leading to the research performed in this document.

After reviewing the existing solutions, this thesis proposes the development and implementation of *Thesis Location System* (TLS), an indoor location system based on the recent technology Bluetooth Low Energy. TLS consists on a wireless sensor network composed by a set of *SensorTag* devices from *Texas Instruments* disposed in fixed and previously known positions, supported by an Android app, that acts as the central module and receives their signals, and by a web page built for configuration purposes which are connected by an external server. The developed work also includes a method of processing the collected data, as well as an analysis of the resulting effects from the tags' signal propagation through the environment. The analysis reveals some evident limitations of the dimensioned system, but even so TLS performs with an average accuracy of 2.5 meters (that can exceed five meters in the worst circumstances), with 77% of the estimates considered as valid.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do Documento	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Técnicas de Localização	5
2.1.1 Fundamentos Metodológicos	5
<i>Fingerprinting</i>	5
Triangulação e Trilateração	5
2.1.2 Aquisição de Tempo	6
<i>Time of Arrival</i> (ToA)	6
<i>Time Difference of Arrival</i> (TDoA)	6
<i>Time of Flight</i> (ToF)	7
Sincronização dos Tempos de Relógio	7
2.1.3 <i>Angle of Arrival</i> (AoA)	8
2.1.4 <i>Received Signal Strength Indication</i> (RSSI)	9
2.2 Tecnologias em Sistemas de Localização	9
2.2.1 <i>Wi-Fi</i>	9
2.2.2 <i>Bluetooth</i>	11
2.2.3 <i>Bluetooth Low Energy</i>	12
2.2.4 Redes de Comunicação Móvel	13
2.2.5 <i>Ultrawideband</i>	14
2.3 Soluções Existentes	15
2.3.1 Sistemas de Navegação Globais por Satélite	15

	GPS	15
	GLONASS	16
2.3.2	Redes de Sensores sem Fios	17
	RADAR	17
	<i>Lai & Cheng Location System</i> (RFID)	18
	<i>iBeacon</i> (BLE)	18
	<i>Hazas & Hopper Location System</i> (Ultrassons)	19
	<i>Ubisense (Ultrawideband)</i>	19
2.3.3	Outros sistemas	20
	<i>MaWi (Wi-Fi)</i>	20
	Localização através da rede GSM	20
2.4	Técnicas de Filtragem de Dados	21
2.4.1	Filtro de Kalman	21
2.4.2	Filtros <i>Alpha-Beta</i>	23
3	Descrição do Sistema	25
3.1	Princípio de Funcionamento	25
3.1.1	Características do sistema	25
3.2	<i>Hardware</i>	27
3.3	Algoritmo de Localização	28
3.4	Base de Dados e <i>Host</i> Remoto	30
3.5	Interfaces com o Utilizador	31
3.5.1	<i>TLSEApp</i> - Aplicação <i>Android</i>	31
3.5.2	<i>System Management</i> - Aplicação <i>Web</i>	35
3.5.3	Tratamento das Coordenadas	38
	Coordenadas Geográficas: Formatos Horário e Decimal	38
	Coordenadas Geográficas e Coordenadas Cartesianas	39
3.6	Protocolo de Comunicação	40
4	Tratamento dos Dados	43
4.1	Caracterização do Sinal e Modos de Medição	43
4.2	Filtragem	46
4.3	Limitações	52
4.3.1	Disparidade nas Medições	52
4.3.2	Diretividade dos Sensores	55
4.3.3	Diretividade dos Dispositivos Recetores	58
4.3.4	Obstáculos e Interferência	61
5	Resultados	69
5.1	Precisão das Estimativas	69
5.1.1	Cenários de Teste	69
5.1.2	Cenário 1	70
5.1.3	Cenário 2	72

5.1.4	Análise	74
5.2	Performance do Servidor Remoto	75
6	Conclusões	79
6.1	Trabalho Futuro	80
	Bibliografia	81

Lista de Figuras

2.1	Trilateração.	6
2.2	Triangulação.	6
2.3	Técnicas de aquisição temporal.	7
2.4	<i>Angle of Arrival</i>	8
3.1	Arquitetura do sistema.	26
3.2	<i>SensorTag</i>	27
3.3	Módulo CC2541.	27
3.4	Mapa inicial da <i>TLSApp</i> e posição do dispositivo em imagens de satélite. .	33
3.5	Fluxograma explicativo do funcionamento da <i>TLSApp</i>	34
3.6	Menu de definições da <i>TLSApp</i>	35
3.7	Menus de <i>login</i> e registo na página <i>web</i>	36
3.8	Painel de controlo da aplicação <i>web</i>	37
3.9	Menu de edição da aplicação <i>web</i>	38
3.10	Mapa com a disposição dos sensores.	38
3.11	Exemplo e formato de uma mensagem <i>HTTP Request</i>	41
3.12	Estrutura da mensagem <i>HTTP Request</i> enviada pela <i>TLSApp</i>	41
3.13	Formato da mensagem de resposta do servidor.	42
4.1	Variação da potência do sinal recebido, sem filtragem, pelo adaptador. . . .	45
4.2	Resposta da primeira filtragem, a 1 <i>m</i> , em função do número de amostras. .	47
4.3	Dimensionamento dos parâmetros do Filtro de Kalman.	49
4.4	Progressão atingida com a introdução do método de filtragem de Kalman. .	50
4.5	Diagrama de blocos do algoritmo de filtragem da <i>TLSApp</i>	51
4.6	Progressão atingida com a introdução da ponderação na <i>TLSApp</i>	52
4.7	RSSI dos <i>SensorTag</i> quando alimentados pela mesma bateria.	53
4.8	Variação média do RSSI durante a experiência na Câmara Anecoica.	55
4.9	Diagrama de radiação da antena IIFA com polarização horizontal.	57
4.10	Diagrama de radiação da antena IIFA com polarização vertical.	57
4.11	Arranjo dos <i>SensorTag</i> sugerido numa divisão de formato regular.	58
4.12	<i>Sony Xperia M2</i>	59
4.13	RSSI, em <i>dBm</i> , medido pelo <i>smartphone</i> a 10 <i>cm</i> de um sensor quando colocado em diferentes pontos.	59

4.14	Relação entre o RSSI e a distância em espaços de diferentes características.	63
4.15	Representação do efeito de obstáculo que se forma em espaços com grande concentração de pessoas.	64
4.16	Esquema representativo dos fenómenos enunciados.	65
4.17	<i>Fingerprints</i> do sinal transmitido pelos <i>SensorTag</i> num mesmo cenário. . .	67
5.1	Planta da sala RF do Instituto de Telecomunicações.	70
5.2	Seguimento da posição no cenário 1.	72
5.3	Planta do apartamento usado como cenário de teste.	73
5.4	Tempo médio de resposta do servidor por cada pedido efetuado.	76
5.5	Tempos de resposta do servidor aos pedidos efetuados à base de dados. . .	76
5.6	Performance da resposta do servidor aos pedidos efetuados à base de dados, em pedidos atendidos por segundo.	76

Lista de Tabelas

2.1	Classes da tipologia <i>Bluetooth</i>	11
2.2	Equações de previsão e atualização do filtro de Kalman.	22
4.1	Características técnicas do adaptador <i>LM506</i>	44
4.2	Identificação dos <i>SensorTag</i> utilizados.	52
4.3	Resultados da análise realizada aos quatro <i>SensorTag</i>	53
4.4	Resultados da experiência na Câmara Anecoica.	55
4.5	Estimativa do RSSI medido pelo <i>smartphone</i> , a 2 m do sensor, na situação de propagação em espaço livre.	60
4.6	Experiência com os <i>SensorTag</i> e aparelhos interferentes.	62
4.7	Diminuição média do RSSI segundo a melhor orientação num percurso de 2.5 m e na presença de um obstáculo humano de 1.6 m de altura a meio caminho.	64
5.1	Precisão e variância das estimativas realizadas no cenário 1.	71
5.2	Precisão e variância das estimativas realizadas no cenário 2.	73
5.3	Precisão das estimativas do cenário 1 com diferentes relações de conversão.	75

Lista de Acrónimos

4G	Quarta Geração das Tecnologias de Comunicação Móvel
A-GPS	<i>Assisted Global Positioning System</i>
ACL	<i>Asynchronous Connection-Less Link</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ATT	<i>Attribute Protocol</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BR/EDR	<i>Basic / Enhanced Data Rate</i>
DETI	Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
EUA	Estados Unidos da América
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FH-CDMA	<i>Frequency Hopping - Code Division Multiple Access</i>
FH-TDD	<i>Frequency Hopping - Time Division Duplex</i>
FHS	<i>Frequency Hop Synchronization</i>
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GMAB	<i>Growing Memory Alpha-Beta Filter</i>

GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I²C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IIFA	<i>Integrated Inverted-F Antenna</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical Radio Band</i>
IT	Instituto de Telecomunicações
JSON	<i>Javascript Object Notation</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-Check Code</i>
LE	<i>Low Energy</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCU	<i>Multipoint Controller Unit</i>
MD5	<i>Message-Digest Algorithm 5</i>
MIME	<i>Multipurpose Internet Mail Extension</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RF	Radiofrequência
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SCO	<i>Synchronous Connection-Oriented</i>
SoC	<i>System-on-a-Chip</i>

SQL	<i>Structured Query Language</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i>
TI	<i>Texas Instruments</i>
TLS	<i>Thesis Location System</i>
ToA	<i>Time of Arrival</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
URSS	<i>União das Repúblicas Socialistas Soviéticas</i>
USART	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
UTRA	<i>Universal Terrestrial Radio Access</i>
UUID	<i>Universal Unique Identifier</i>
UWB	<i>Ultrawideband</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPA	<i>Wi-Fi Protocol Access</i>
WPA2	<i>Wi-Fi Protocol Access 2</i>
WPS	<i>Wi-Fi Protected Setup</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A quantidade de dispositivos e aplicações existentes nos dias de hoje que permitem determinar a localização de seres e objetos em tempo real é tão vasta e, por vezes, de utilidade tão duvidosa, que podemos ser tentados a pensar que este é apenas mais um simples capricho de uma Humanidade que vive constantemente à procura de melhorar a sua qualidade de vida na era tecnológica em que vivemos. No entanto, a necessidade de localização e orientação sempre foi, desde o início da vida humana, uma necessidade vital, decisiva no desenvolvimento da própria espécie.

A capacidade de se *localizar a si próprio* e de se orientar na procura de recursos imprescindíveis à sua sobrevivência é algo inato não apenas à nossa espécie, mas também a outras, desde os primórdios da existência. Para o Homem dessa altura, o principal meio de orientação para longas distâncias eram os astros. Contudo, o desenvolvimento da espécie humana levou ao aparecimento das primeiras comunidades e civilizações, o que agudizou a necessidade de *localizar aquilo que nos rodeia*. Esta evolução é atestada, entre outros marcos, pelo aparecimento dos primeiros mapas, numa época que remonta ao sétimo milénio anterior ao nascimento de Cristo.

A *procura incessante* do Homem *pelo desconhecido* desempenhou também um papel importante. No desenvolvimento dos processos de orientação e localização, após conquistarem grande parte da Europa, os Romanos edificaram, até ao século IV, uma impressionante rede de vias de comunicação por todo o seu Império. E quando vários séculos mais tarde, no início do século XV, o povo português se lançou, pelo inexplorado oceano, numa gloriosa era de descobrimentos, que viria a ser seguida por diversos reinos do continente europeu, poucos acreditariam que grande parte da superfície da Terra estava ainda por conhecer. Estas grandiosas epopeias que *deram novos mundos ao mundo* contribuíram de maneira decisiva para a exploração da geografia terrestre, além de terem sido responsáveis por avanços importantes nos domínios das ciências náuticas e da cartografia. Nessa época, a localização dos barcos em alto mar era feita recorrendo a instrumentos como o astrolábio, que permitia perceber o posicionamento dos astros no céu e assim determinar a latitude;

apesar de alguma fiabilidade, as medições assim realizadas eram muito pouco exatas e estavam condicionadas à existência de condições meteorológicas francamente favoráveis...

O passar dos séculos conduziu a uma progressiva compreensão do mundo, que culminou no modo como atualmente o conhecemos. O frêmito tecnológico a que se assistiu no século XX, potenciado pela ocorrência de duas Guerras Mundiais e tendo como grandes impulsionadores os sistemas militares e de defesa, contribuiu para uma completa revolução da nossa forma de viver, e também no capítulo dos sistemas de localização as potencialidades são atualmente imensas: podemos de forma simples e em tempo real saber em que local nos encontramos, obter direções para qualquer local onde nos queiramos deslocar e encontrar pontos de interesse nessa área. Se necessitarmos de nos deslocar de automóvel, podemos saber qual o estado do tráfego durante o percurso e o tempo que demoraremos efetivamente a chegar ao nosso destino. Ou, se optarmos por ir de transporte público, saber quanto tempo falta até que este chegue à paragem mais próxima. Podemos sair para praticar qualquer desporto e no final verificar o nosso percurso e ter acesso a diversas estatísticas. Em suma, podemos localizar e ser localizados. E as aplicações não se restringem ao uso civil, até porque os sistemas de localização têm na sua origem propósitos militares, sendo de há algumas décadas a esta parte utilizados nos domínios da navegação marítima, aeronáutica, aeroespacial, balística, entre outras áreas do conhecimento científico. No entanto, ainda que os propósitos dados aos sistemas de localização sejam vários e distintos, o grau de exatidão dos mesmos, tendo experimentado uma forte evolução ao longo dos anos, não é ainda o ideal.

Dos diversos sistemas de localização existentes, o sistema GPS é o mais amplamente utilizado. Em média, os dados obtidos possuem uma precisão de 7.8 metros, com uma percentagem de confiança de 95% [1]. Ainda assim, como o nível de precisão depende em grande medida das características de propagação do meio e da qualidade dos recetores, este valor pode facilmente aumentar desde o melhor caso (cerca de 3 metros) até ao ponto em que o erro se torna tão significativo que torna impossível a obtenção de uma localização válida [2]. Esta característica do sistema GPS ocorre, pois, com maior incidência em ambientes interiores (*indoor*) ou em zonas densamente urbanizadas, fruto das múltiplas reflexões sofridas pelos sinais; tal leva a que não seja possível, apenas recorrendo ao sistema GPS, fazer a localização dentro de edifícios, com todas as limitações que daí advêm.

Esta lacuna, que pode ser encontrada não apenas no sistema GPS mas também na generalidade dos sistemas de navegação por satélite (GNSS), levou ao surgimento de soluções alternativas, baseadas em outras tecnologias e, em certos casos, passíveis de ser utilizadas como complemento ao próprio sistema. Estas soluções, que tiraram partido do desenvolvimento dos dispositivos móveis e das redes sem fios de curto alcance ocorrido na última década, são essencialmente baseadas em sinais de radiofrequência (RF), podendo resultar do mapeamento exaustivo das características dos sinais da rede de comunicações móveis ou de outras redes e protocolos de comunicação, como *Wi-Fi* ou *Bluetooth*. Noutros casos, os métodos de localização são também baseados numa lógica de redes de sensores sem fios. Estes sistemas apresentam, normalmente, melhores resultados que os sistemas GNSS nos ambientes referidos, mas também possuem diversas limitações, sendo transversal a todos eles a inexistência de uma resolução verdadeiramente global, isto é, que seja capaz de ultra-

passar as condicionantes próprias dos espaços considerados e seja aplicável em diferentes locais sem que, para isso, seja obrigatório redimensionar a forma como os dados são obtidos e tratados pelo sistema, o que se traduz em mais tempo e mais recursos consumidos para determinar a localização dos utilizadores, sem que por vezes se alcancem os melhores resultados.

Existindo diversos serviços baseados na localização de dispositivos torna-se, assim, importante encontrar processos e explorar tecnologias que permitam a implementação global de um sistema e minimizem as zonas onde os clientes desconheçam a sua localização, sem descuidar a precisão das posições estimadas, na perseguição por um sistema de localização tão fiável quanto rigoroso – ao encontro da concretização plena de um dos mais antigos anseios da espécie humana.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é a conceção de um sistema de localização alternativo aos GNSS que permita fazer o seguimento de um dispositivo usando, do modo mais eficiente possível, as informações que se encontrem ao seu alcance. Este sistema deve ser globalmente escalável, permitindo a sua aplicação em qualquer tipo de espaços (condicionada a pequenos ajustes na sua performance e execução) e, com recurso às tecnologias atuais, preferencialmente emergentes (que ainda não tenham sido extensivamente exploradas, no sentido de explorar novas formas de localização), fazer uso das diferentes metodologias já implementadas neste âmbito para calcular a posição dos dispositivos, com um grau de aproximação semelhante ou superior ao das alternativas atualmente existentes.

As etapas formuladas para o desenvolvimento do trabalho foram as seguintes:

- Fazer o levantamento dos métodos e tecnologias aplicados no desenvolvimento de sistemas de localização em tempo real, com especial ênfase em sistemas autónomos e alternativos aos sistemas GNSS;
- Fazer o levantamento das soluções disponíveis no mercado;
- Desenvolver as bases de um sistema de localização para dispositivos móveis;
- Desenvolver, na plataforma *Android*, uma aplicação que permita implementar o sistema de localização projetado;
- Avaliar o sistema, analisando os resultados obtidos e confrontando-os com as diversas soluções disponíveis.

1.3 Organização do Documento

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, correspondendo o primeiro às considerações introdutórias feitas nas secções anteriores. O conteúdo dos restantes capítulos aborda os seguintes temas:

- O capítulo 2 corresponde ao levantamento das principais técnicas e soluções de localização em tempo real, onde se inclui uma descrição das principais tecnologias utilizadas para o efeito;
- No capítulo 3 faz-se a caracterização do sistema que se pretende implementar e descrevem-se aspetos referentes ao seu desenvolvimento, ao funcionamento interno e às interfaces criadas para permitir a comunicação entre o sistema e os utilizadores;
- O capítulo 4 é o capítulo mais longo do documento. Numa fase inicial é retratada a aplicação de um método de tratamento dos dados, essencial para o funcionamento do sistema proposto, a que se segue um estudo das características de propagação e das limitações evidenciadas;
- No capítulo 5 apresentam-se os testes realizados ao sistema desenvolvido e os resultados obtidos, que são devidamente analisados em seguida;
- O capítulo 6 encerra a dissertação com o enunciar das conclusões, centradas sobre os resultados obtidos e complementadas com propostas de trabalho futuro, no sentido de serem corrigidos alguns aspetos que foram abordados de forma menos conseguida no decurso do trabalho.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Técnicas de Localização

2.1.1 Fundamentos Metodológicos

Fingerprinting

O método de *fingerprinting* consiste no mapeamento exaustivo das características de um determinado meio com vista à criação de um algoritmo de localização. Ao contrário dos restantes modelos, que são aplicados de forma global e só depois adaptados às particularidades do ambiente em que são implementados, o *fingerprinting* permite a calibração *a priori* do modelo. Pode ser dividido em duas fases: a primeira, de formação, inclui a pesquisa e medição das propriedades do sinal, com a criação de uma grelha de pontos que simula a área de interesse; a segunda corresponde ao aproveitamento das informações recolhidas para estimar um modelo que permita obter, através de interpolação, a posição dos dispositivos.

A morosidade e a complexidade deste trabalho são as principais desvantagens colocadas à adoção de um modelo deste género, a tal ponto que quando o mapeamento tem que ser aplicado em áreas exteriores de dimensão apreciável, este é não raras vezes realizado com recurso a um automóvel. Quanto mais pormenorizadas forem as medições, melhor será a calibração, mas também maiores serão os custos associados. Por outro lado, se as características da área analisada se alterarem, também o modelo terá que ser alterado. No entanto, a sua eficácia é relevante, sendo por isso bastante utilizado em espaços de pequena dimensão [3].

Triangulação e Trilateração

A trilateração e a triangulação são processos matemáticos que permitem, respetivamente através da medição de distâncias e da diferença angular, determinar a posição relativa ou absoluta de um ponto a partir de múltiplas posições de referência.

Na trilateração, para se conseguir obter a posição de um ponto em duas dimensões são necessárias três posições de referência. A posição é dada a partir da interseção de

três circunferências, centradas nos pontos de referência e de raio igual à distância entre as mesmas e o ponto que se pretende localizar. A triangulação segue a mesma lógica, com a diferença de apenas dois pontos de referência serem necessários, sendo as coordenadas e a distância ao ponto a localizar calculadas previamente, a partir de medições dos ângulos e dos lados do triângulo formado por este ponto e pelos dois pontos de referência conhecidos.

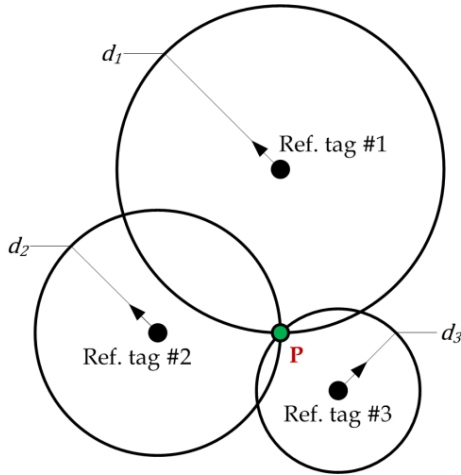


Figura 2.1: Trilateração. [4]

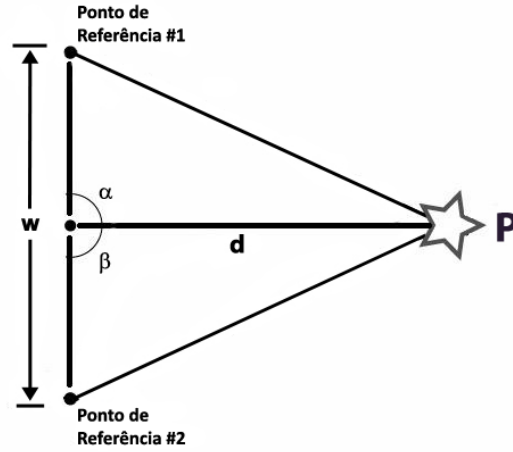


Figura 2.2: Triangulação.

2.1.2 Aquisição de Tempo

Nome dado às diferentes técnicas existentes para localização que se baseiam na medição dos tempos de propagação de um sinal transmitido entre um emissor e diversos recetores. Sendo conhecida a velocidade de propagação do sinal, é possível calcular a distância a que um dispositivo se encontra dos restantes. Os três principais métodos apresentam-se resumidamente de seguida e encontram-se representados na figura 2.3.

Time of Arrival (ToA)

É a técnica mais simples e assenta na medição do tempo de propagação de um sinal, determinado pela diferença entre o tempo de chegada (ToA) medido pelo recetor e o instante em que a transmissão foi realizada pelo emissor. Este procedimento requer uma rigorosa sincronização dos relógios do emissor e do recetor: quando a distância entre os dois pontos ou a velocidade de propagação são elevadas, um pequeno desfasamento nos tempos de relógio é capaz de adulterar gravemente o valor calculado.

Time Difference of Arrival (TDoA)

Este método de localização em rede estima a posição de um dispositivo com base na diferença temporal obtida quando o sinal por ele emitido é recebido em outros equipamentos. Tal como no ToA, também neste caso a sincronização dos relógios de emissor e

recetores é importante. Para que seja possível determinar a localização do emissor são necessários pelo menos três recetores, cuja posição seja conhecida, de tal forma que seja possível calcular duas diferenças temporais que, ao serem convertidas para distâncias, formem duas hipérboles correspondentes às posições possíveis para a localização do emissor. A interseção entre as duas hipérboles resulta na posição pretendida.

Time of Flight (ToF)

A técnica de tempo de voo é semelhante à *Time of Arrival*, com a significativa diferença de que o tempo de chegada é também medido pelo emissor, ao receber uma confirmação enviada pelo recetor. O tempo de transmissão, e consequente distância, são depois calculados retirando o tempo de processamento do sinal pelo recetor e contabilizando apenas um dos sentidos da comunicação. Desta forma, a necessidade de sincronizar os relógios do emissor e do recetor é eliminada, já que os tempos são cronometrados apenas pelo relógio do emissor.

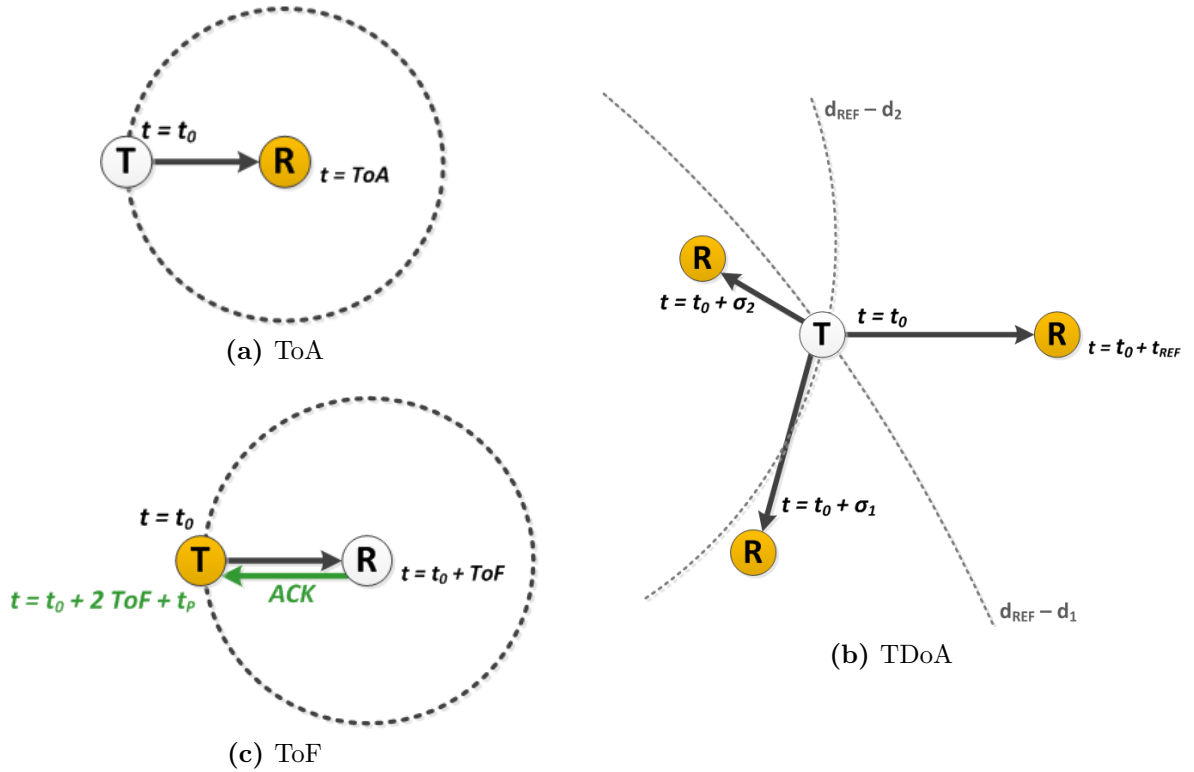


Figura 2.3: Técnicas de aquisição temporal. Os dispositivos que processam a informação recolhida encontram-se representados pela cor dourada.

Sincronização dos Tempos de Relógio

O sincronismo dos tempos de relógio pode ser conseguido de diversas formas, existindo um conjunto de protocolos definidos para o efeito. Um dos mais utilizados é o método de

Offset Delay Estimation, implementado no *Network Time Protocol* (NTP), utilizado pelo sistema GPS e por outros sistemas baseados em redes *wireless*, que assenta numa estrutura hierárquica de servidores: o servidor raiz sincroniza-se com o padrão temporal universal UTC e a sincronização entre servidores de diferente nível é feita através da troca de *timestamps*, sequências codificadas de caracteres que descrevem o momento da ocorrência de um evento. Cada mensagem NTP inclui os três *timestamps* anteriores e um quarto adicional é estabelecido à chegada da mesma, o que permite a dois servidores calcular o desfasamento temporal entre si através da troca bidirecional destas mesmas mensagens. A troca de mensagens entre dispositivos para efetuar a sincronização é, com efeito, bastante utilizada, mas certos procedimentos induzem erros significativos – o tempo que as mensagens tardam a chegar ao recetor é muito variável e dificilmente mensurável, devido a variações no tráfego da rede e no *routing* (encaminhamento) das mensagens [5].

2.1.3 *Angle of Arrival* (AoA)

Técnica que determina a distância a um ponto emissor pelo ângulo de chegada do sinal ao recetor, relativo a uma direção base a que se chama *orientação*. É possível realizar medições utilizando o AoA através de um conjunto de vetores de antenas direcionais, dispostas o mais vastamente possível para que formem um ângulo de 360° – quanto maior o número de antenas do vetor, maior será a cobertura angular da antena. Para obter uma localização a duas dimensões são necessários apenas dois vetores posicionalmente desfasados: os vetores recebem a mesma onda emitida, verificando o ângulo a que esta foi recebida relativamente à orientação. Através de um cálculo baseado em princípios trigonométricos, obtém-se a posição do emissor como o local onde se interseccionam as duas retas que indicam a direção da onda incidente em cada vetor [6].

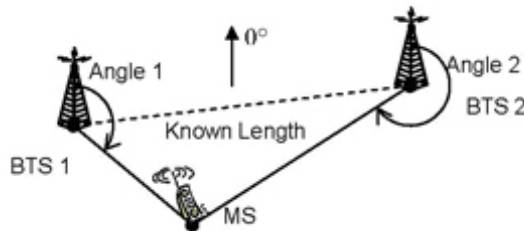


Figura 2.4: *Angle of Arrival*. [7]

Trata-se de um método menos rigoroso que os anteriores por não ser, na globalidade, imune a erros de medição: a principal reserva verifica-se por nem sempre a intensidade do sinal emitido ser máxima no sentido do recetor, devido à existência de obstáculos no percurso que conduzem à ocorrência de reflexões (problema que condiciona igualmente as técnicas temporais) mas também devido às próprias antenas, que possuem irregularidades na radiação. Como tal, a intensidade sofre variações de acordo com a direção. Além disso, se o vetor não estiver equipado com um número suficiente de antenas, ou se as

mesmas estiverem colocadas deficientemente, a cobertura angular não ficará completa, o que introduzirá *a priori* um erro na medição do ângulo de chegada. Apesar de todas estas limitações, o AoA apresenta uma vantagem que se prende com a sincronização dos relógios, necessária apenas no caso de o alvo ou de os recetores se encontrarem em movimento.

2.1.4 *Received Signal Strength Indication* (RSSI)

O RSSI (*Received Signal Strength Indication*) é a medida da potência de um sinal recebido por um dispositivo. Um algoritmo de localização baseado em RSSI segue a ideia de que um sinal emitido por um aparelho vai, gradualmente, perdendo energia à medida a que a distância a que é propagado aumenta, até a uma distância a que o sinal, naturalmente, se desvanecerá. O aproveitamento dos dados da potência de vários dispositivos (convertidos em distância relativamente ao emissor) pode ser aproveitado para o cálculo da posição através dos métodos da triangulação, trilateração ou de *fingerprinting*.

A correspondência que existe entre a potência e a distância é a base para o estabelecimento do modelo de localização; no entanto, revela-se muitas vezes como um problema difícil de ultrapassar. O decaimento, na esmagadora maioria dos casos, não é linear e muito menos uniforme, variando com a direção de propagação, devido a fenómenos de reflexão por obstáculos ou a interferências. A própria propagação do sinal é, muitas vezes, influenciada por fatores exógenos como a temperatura e a humidade, o que impede que seja considerada constante em áreas relativamente extensas. Desta forma, a aplicação deste tipo de sistemas implica um elevado esforço de medição e de modelação ao ambiente em que são implementados, o que limita a sua utilização. A precisão do sistema depende, em grande parte, do grau de extensividade da adaptação realizada, bem como da potência de transmissão do sinal.

2.2 Tecnologias em Sistemas de Localização

2.2.1 *Wi-Fi*

O *Wi-Fi* (*Wireless Fidelity*) é uma tecnologia sem fios que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas para realizar a conexão entre dispositivos e facilitar trocas de informação, orientada pelo padrão internacional IEEE 802.11 que descreve as características de uma rede local sem fios. Lançada em 1997, impôs-se como uma das grandes novidades tecnológicas do início do século XXI, encontrando-se atualmente disseminada por todo o mundo em aplicações pessoais, industriais e militares. A rede é formada por diversos clientes – detentores de placas de rede sem fios – e dispositivos de agregação (denominados de *access points* ou *bridges*). Graças ao *Wi-Fi* é possível criar redes locais sem fios de elevado débito, desde que o dispositivo a conectar se encontre próximo do ponto de acesso (*hotspot*).

O padrão IEEE 802.11 pode ser classificado consoante a velocidade e a frequência a que é implementado. As duas implementações mais bem sucedidas encontram-se na banda ISM

(*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4 GHz, um conjunto de frequências destinado a aplicações em RF que não se encontrem diretamente relacionadas com telecomunicações e onde se encontra implementada uma boa parte dos dispositivos *wireless* existentes. São elas:

- a IEEE 802.11b, a mais utilizada e antiga versão do padrão ainda operacional, com uma velocidade de 11 Mbps, ajustável para valores inferiores nas situações em que seja necessário evitar interferência ou perdas de sinal;
- a IEEE 802.11g, com taxas de transmissão até 54 Mbps.

A mais recente versão do protocolo é a IEEE 802.11ac, divulgada em dezembro de 2013, e propõe significativas melhorias ao nível da largura de banda e da segurança na transmissão dos dados – com frequência de 5 GHz, largura de banda até 160 MHz (em vez dos anteriores 40 MHz) e taxas de transmissão que poderão atingir os 1.3 Gbps [8].

As redes *Wi-Fi* permitem dois modos de operação, *ad-hoc* e *infrastructure*. As redes *ad-hoc*, também conhecidas como *peer-to-peer* (P2P), são as mais simples, constituídas por um grupo de computadores com os mesmos privilégios que comunicam diretamente, partilhando os mesmos procedimentos de segurança. Ao contrário, numa *infrastructure* os dispositivos acedem à rede através de um ou mais *routers* e/ou *access points*, que são os elementos centrais da rede. A rede *infrastructure* é mais complexa mas é centralizada, o que facilita a sua gestão e torna mais fácil o seu desenvolvimento [9].

Uma das lacunas das redes *Wi-Fi* é a elevada suscetibilidade a interferências, causadas pela rede de comunicações móveis, micro-ondas ou mesmo por outras WLANs. Tal acontece já que os dispositivos pertencentes às implementações mais utilizadas operam a uma frequência igual à dos restantes aparelhos. Para combater este tipo de interferência, estas implementações utilizam sequências diretas de espalhamento do espectro (DSSS), que permitem transmitir o sinal numa banda de frequências bastante superior àquela que é estritamente necessária, aumentando a sua resistência a interferências. Ainda assim, o maior problema destas redes reside no aspeto da segurança. Após diversos esforços levados a cabo, ao longo dos anos, pela *Wi-Fi Alliance*, organização que se ocupa da certificação das redes *Wi-Fi*, no sentido de criar novos e cada vez mais eficazes protocolos de segurança, entre os quais se contam o *Wired Equivalent Privacy* (WEP), o *Wi-Fi Protocol Access* (WPA) e o mais recente WPA2, as redes *Wi-Fi* são ainda hoje permeáveis a falhas de segurança, acentuadas com o surgimento de irregularidades críticas em novas aplicações complementares ao padrão, como é o caso da WPS (*Wi-Fi Protected Setup*) [10]. Uma descrição mais detalhada destes problemas pode ser encontrada em [11].

Em termos teóricos o alcance deste tipo de redes é variável, podendo atingir um máximo de 46 metros em ambientes interiores e de 92 metros em ambientes exteriores, mas devido às condições de propagação de sinal no meio os valores obtidos são por norma bastante mais modestos. Os sistemas de localização que utilizam as redes *Wi-Fi* encontram-se já fortemente disseminados sobretudo em ambientes interiores, onde conseguem atingir bons índices de desempenho, com a precisão dos mesmos a variar entre os 2 e os 4 metros na maior parte dos casos, ainda que requeiram significativos esforços de adaptação aos espaços [12]

em que são instalados. Ao ar livre, pelas dificuldades em encontrar *access points* disponíveis e em realizar a calibração do sistema, dadas as características peculiares de cada local, o dimensionamento de um sistema generalizado torna-se bastante mais complexo, embora em certas áreas metropolitanas de grande dimensão seja possível dimensionar sistemas que, requerendo baixa calibração, obtêm um nível de precisão médio entre os 13 e os 40 metros [12] que é, ainda assim, pior que o dos sistemas GNSS existentes.

2.2.2 Bluetooth

O *Bluetooth* é uma tecnologia de comunicação sem fios utilizada para transmissão de dados em situações de curto alcance, caracterizada por um baixo consumo de energia associado a uma baixa taxa de transmissão. Opera numa banda de frequência variável entre os 2.4 e os 2.5 *GHz* através de *Frequency Hopping* – FH-CDMA (*Code Division Multiple Access*), o que garante a inexistência de interferência dada a separação de frequências e a alternância entre as mesmas caso seja necessário. De acordo com a localização, podem ser utilizadas 23 ou 79 frequências da faixa ISM, espaçadas por 1 *MHz* [13].

A comunicação por *Bluetooth* é feita em *full-duplex* (um dispositivo pode transmitir e receber informação), pelo que a transferência é alternada entre canais de transmissão e de receção, num esquema que se denomina de FH-TDD (*Time Division Duplex*). Cada canal esgota-se ao fim de um período de 625 μ s, pelo que a alternância entre canais ocorre a um ritmo de 1600 saltos por segundo.

A transmissão de dados entre emissor e recetor(es) permite ligações ponto-a-ponto e ponto-multiponto e é realizada através do padrão síncrono SCO (*Synchronous Connection-Oriented*) e do padrão assíncrono ACL (*Asynchronous Connection-Less*). O SCO estabelece uma ligação sincronizada entre os dispositivos, separando os canais de emissão e receção, pelo que a retransmissão de dados em caso de perda não é garantida, ainda que seja possível recuperar os dados perdidos através de correção posterior (FEC). É indicado para comunicações contínuas de dados (voz), suportando transferências periódicas de 64 *Kbps* em cada sentido. Por outro lado, o protocolo ACL utiliza canais que se encontrem previamente livres, garantindo a retransmissão de pacotes de dados que sejam perdidos, sendo indicado para situações de transferência de arquivos. Um olhar mais aprofundado sobre estas especificações, bem como sobre os protocolos de transporte e aplicação, pode ser encontrado em [13].

Classe	P_{max} (mW)	Alcance (m)
1	100	100
2	2.5	10
3	1	1

Tabela 2.1: Classes da tipologia *Bluetooth*.

A tipologia *Bluetooth* está dividida em três classes, consoante o alcance da comunicação, que é influenciada pela potência máxima fornecida pelo dispositivo. Dois dispositivos de

classes diferentes podem comunicar entre si sem limitações, desde que o dispositivo de classe inferior se encontre pelo menos à distância mínima do dispositivo de classe superior. O alcance efetivo de cada dispositivo depende, ainda assim, das condições de propagação do meio, de variações na produção ou das configurações da antena.

Quando dois dispositivos se ligam para uma transferência de informação através de *Bluetooth*, formam uma rede que se designa por *piconet*. Cada *piconet* pode, em ligações ponto-multiponto, albergar até 8 dispositivos comunicantes, mas simultaneamente apenas um pode ser o emissor (*master*), sendo os restantes recetores (*slaves*). Os dispositivos que integram uma *piconet* podem também estabelecer ligações com dispositivos pertencentes a outra *piconet*, formando um aglomerado de redes que se designa por *scatternet* [14]. A identificação dos dispositivos pertencentes a uma determinada *piconet* é realizada através do envio de um sinal *Inquiry*, cuja resposta positiva é encaminhada sob a forma de pacotes de sincronização *Frequency Hop Synchronization* (FHS). Quando a comunicação entre dois dispositivos – acionada pelo envio e receção de um sinal *Page* – é estabelecida, o emissor envia novo sinal (*Scan*) dando ordem aos restantes dispositivos da *piconet* para que entrem em modo de descanso, num processo que tem em vista a limitação da dissipação de energia [13].

2.2.3 *Bluetooth Low Energy*

Oficialmente formalizada em 1998, a tecnologia *Bluetooth* conheceu diversos desenvolvimentos ao longo dos anos que melhoraram as características do sistema e eliminaram limitações existentes. A versão mais recente é a *Bluetooth 4.2*, que permite duas variações de comunicação sem fios: a *Basic / Enhanced Data Rate* (BR/EDR) e a *Low Energy* (BLE), também comercializada como *Bluetooth Smart*. Foi criada com o propósito de transmitir periodicamente pacotes muito pequenos de dados em aplicações de curto alcance, consumindo assim muito menos energia que os dispositivos BR/EDR, e introduziu o conceito da Eletrónica de Baixa Potência ao *Bluetooth Core Specification*, permitindo que dispositivos *Bluetooth* possam funcionar durante meses, ou mesmo anos, apenas com recurso a pequenas baterias e tornando-o indicado para produtos que contenham dispositivos eletrónicos de pequena dimensão.

Tal como nas versões clássicas do *Bluetooth*, a ligação entre dispositivos assenta numa lógica *master-slave*, mas a tecnologia *Low Energy* permite um número de recetores bastante superior, dependendo da memória disponível. Estes são capazes de emitir uma mensagem informativa, que será recebida por outros dispositivos que se encontrem a perscrutar a rede, no caso de possuírem informação disponível para ser transmitida. Mais importante ainda é que ao contrário das restantes versões, o *Bluetooth Low Energy* introduz novos predicados para o estabelecimento de ligações. Todas as comunicações em BLE são efetuadas a partir de um servidor GATT (*Generic Attribute Profile*), que estabelece as definições de uma arquitetura de serviços baseada no protocolo de atribuição ATT para procurar outros dispositivos e com eles constituir ligação [15].

No servidor GATT os dados são formatados como características, compostas por um valor armazenado e por um conjunto opcional de campos que o descrevem. Estas carac-

terísticas podem ser agrupadas em conjuntos, que se designam por serviços. Um GATT *Profile* é o resultado do agrupamento de diversos serviços, distinguíveis por um identificador universal (UUID). Quando uma ligação é estabelecida entre dois dispositivos, os dados são transportados segundo o protocolo ATT no sentido servidor-cliente e na forma de atributos, pequenos pacotes de informação identificados por uma chave que se designa por *handle*. Caso o valor de um atributo seja alterado, o cliente é automaticamente notificado pelo servidor, evitando que o mesmo precise de realizar um novo pedido. Como nota adicional, refira-se que por muito que possam existir diversos clientes para um só servidor, as transferências de informação via servidor GATT são exclusivas, ou seja, um periférico só pode estar conectado a um dispositivo de cada vez [16]. Pelas razões apresentadas, o BLE não é compatível com as versões clássicas do padrão *Bluetooth* – ou seja, um dispositivo que apenas implemente BLE não consegue comunicar com outro dispositivo que apenas possua uma versão *Bluetooth* “clássica”. As especificações *Bluetooth* 4.0 e superiores permitem que os dispositivos implementem, se necessário, as duas versões no mesmo sistema [17].

Ao nível da camada física, a transferência de dados em BLE pode ser realizada a uma taxa de transmissão de 1 *Mbps*, encontrando-se os pacotes de dados transmitidos restrinidos a um tamanho máximo de 27 bytes [15]. O alcance das ligações encontra-se habitualmente na ordem das dezenas de metros, podendo segundo as especificações ultrapassar a centena de metros em condições muito favoráveis. Uma outra particularidade desta versão assenta no facto de os dispositivos LE se manterem em suspensão durante grandes períodos de tempo e só reiniciarem a sua atividade quando uma ligação é estabelecida; isto leva a que a intensidade da corrente no circuito, que nunca ultrapassa os 15 *mA*, tenha um valor médio muito mais baixo, de 1 μ A [15].

Numa análise aos níveis de precisão obtidos pelos sistemas de localização em *Bluetooth*, verifica-se que a sua performance é similar à obtida nas implementações *Wi-Fi*, com níveis de precisão médios entre os 2 e os 3 metros, utilizando *fingerprinting* em ligações de alcance acomodável a dispositivos das classes 2 e 3. Por ser uma tecnologia bastante mais recente, as implementações de sistemas de localização em BLE são ainda escassas, mas dado o seu reduzido alcance esta tecnologia será suscetível de realizar estimativas com igual ou maior precisão, ainda que a baixa energia da ligação, aliada a níveis de ruído elevados, possa funcionar como fator degenerativo [18].

2.2.4 Redes de Comunicação Móvel

O GSM (*Global System for Mobile Communications*) é um paradigma de comunicações móveis, criado na Finlândia em 1991, que corresponde à segunda geração das redes de comunicação móvel (2G). É, ainda hoje, um dos padrões de comunicação com maior abrangência a nível mundial. Difere da primeira geração por utilizar a digitalização e compressão dos dados, sendo os mesmos transmitidos através de um canal no qual são, também, transportados dados de outros utilizadores por via do método de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). Inicialmente implementado na banda de frequências dos 900 *MHz*, foi rapidamente adaptado para 1800 *MHz*, e a sua introdução na América do Norte levou ainda à implementação a 800 e a 1900 *MHz* [19]. Qualquer que seja a frequência utilizada

pelo operador, a largura de banda está dividida em canais de 200 *kHz* (FDMA), que por sua vez se encontram divididos em 8 *timeslots* [20].

Cada estação-base da rede GSM está habitualmente equipada com diversas antenas direcionais que, quando associadas, formam setores que se designam por *células*. Cada célula encontra-se equipada com um número de canais que depende do tráfego previsto e das especificações impostas pelo operador, e os canais são alocados de forma a minimizar a interferência entre as diversas células – o mesmo canal, quando reutilizado (para aumentar a capacidade em número de utilizadores), deve sê-lo por células que se encontrem o mais afastadas possível [20]. Adicionalmente, cada célula possui um canal unidirecional para controlo de transmissão, que transporta um padrão de mensagens com informações sobre a identidade das células vizinhas, bem como acerca das configurações e dos recursos disponíveis a partir da estação-base. A transmissão de informação neste canal é, ao contrário do que acontece nos restantes, realizada sempre à mesma potência, o que permite às estações móveis determinar a potência de sinal das células vizinhas e escolher as mais próximas para estabelecer comunicação [21].

Inicialmente indicado apenas para comunicações de voz devido à reduzida largura de banda, rapidamente serviu como base para a integração de outros serviços, permitindo taxas de transmissão até 9.6 *Kbps*. Foi, ao mesmo tempo, sucedido pelas comunicações por transmissão de pacotes de dados (GPRS), também conhecidas como 2.5G, que eliminaram este problema. Com o advento da terceira geração UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) e a maior largura de banda da interface rádio UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) uma série de novos serviços foi tornada possível, e atualmente, já na quarta geração de comunicações móveis (4G), são exequíveis taxas de transmissão de dados superiores a 20 *Mbps*. No entanto, o padrão GSM é ainda hoje utilizado não só para comunicação de voz ou dados entre dispositivos, mas também para outras aplicações, entre as quais se contam os sistemas de deteção de trânsito e os sistemas de localização, que fazem uso das particularidades acima enunciadas. Os níveis de precisão obtidos são mais consistentes em áreas de cariz predominantemente urbano, pelo facto de a distribuição de células GSM ser nesses locais mais concentrada (de modo a fazer face aos maiores índices de tráfego), e variam desde as dezenas de metros até valores mais baixos (3 a 5 metros) quando aplicados, em ambientes interiores, juntamente com o método de *fingerprinting*. A diferenciação entre operadores é também um aspeto a ter em conta, dada a complexidade das redes que exploram [21, 22, 23].

2.2.5 Ultrawideband

O *Ultrawideband* (UWB) é uma tecnologia de radiofrequência que permite a transmissão de grandes quantidades de dados, a baixa potência, através de um vasto espectro de frequência. A transmissão por UWB difere das anteriormente apresentadas já que em vez de efetuar a divisão do espectro, forçando a emissão de dados por *slots*, a mesma potência de sinal é transmitida o mais amplamente possível, reduzindo assim a densidade espectral. Desta forma, a transmissão ocorre sobre a forma de rajadas de pulsos, que podem chegar a ser da ordem dos 10^9 /s na generalidade dos sistemas de comunicação que a utilizam.

Como a suscetibilidade à existência de erros na propagação de sinal é elevada, por força das elevadas taxas de transmissão, este tipo de sistemas utiliza técnicas de correção FEC (*Forward Error Correction*), onde os recetores, com modulação OFDM, utilizam códigos de verificação de paridade (LDPC). Por outro lado, a muito pequena duração dos pulsos, na ordem dos nanossegundos, faz com que estes sejam menos sensíveis a colisões, minimizando os efeitos de múltipla trajetória.

A tecnologia UWB proporciona uma excelente base ao estabelecimento de mecanismos de posicionamento, dada a sua elevada capacidade de resolução no domínio do tempo, e a sua aptidão para eliminar as componentes de múltipla trajetória torna possível a obtenção de estimativas precisas sem necessidade de recorrer a complexos algoritmos de estimação. Ainda assim, no que ao emprego de técnicas de localização diz respeito, as estimativas com base no tempo de propagação do sinal (referenciadas na subsecção 2.1.2) ficam fortemente comprometidas. O tempo decorrido entre o envio sucessivo de impulsos (tempo de *chip*) é, na maior parte dos casos, substancialmente inferior ao seu tempo de deslocamento, o que aliado à muito pequena duração dos impulsos favorece o aparecimento de fenómenos de *jitter*, mesmo que seja recorrente a utilização de relógios de elevada precisão [24].

2.3 Soluções Existentes

2.3.1 Sistemas de Navegação Globais por Satélite

GPS

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) [1] foi criado e é mantido pelo *U. S. Department of Defense* com o objetivo de assegurar a localização de pontos estratégicos em cenários de conflito, mas a abertura a propósitos civis levou a que seja atualmente o sistema de localização mais utilizado em todo o mundo.

A infraestrutura orbital é constituída por 29 satélites que giram à volta do planeta, a cerca de 20 000 km de altitude, com uma inclinação de 55° relativamente ao Equador. Os satélites estão equipados com relógios atómicos e encontram-se dispostos de modo a que cada ponto à superfície da Terra possa, a qualquer momento, ser servido por pelo menos quatro satélites – a utilização de três satélites é por si só suficiente para que se consigam resultados a duas dimensões, só que com fraca precisão, pelo que a utilização de um quarto satélite atenua consideravelmente estas imprecisões e permite, ainda, obter localização tridimensional. O segmento de controlo monitoriza e identifica os sinais enviados pelos satélites e é constituído por 5 estações, comandadas por uma outra (*Master Control Station*) que tem como função corrigir as anomalias existentes no sistema [25].

Os satélites transmitem sinais de radiofrequência com baixa intensidade e codificação universal, de frequência entre 1 e 2 GHz, destacando-se as frequências L1 (1575.42 MHz) e L2 (1227.60 MHz) [26]. Estes sinais são intercetados pelos dispositivos recetores, o que lhes permite calcular a distância a cada um dos satélites detetados, através da multiplicação do tempo de transmissão do sinal, cronometrado pelo próprio recetor, pela velocidade da luz. Desta forma, o número de recetores GPS disponíveis a utilizar a mesma informação

dos satélites é, idealmente, infinito. Os recetores calculam a sua posição relativa usando o método da triangulação, descrito anteriormente.

Além das limitações evidenciadas ao nível da propagação de sinal, que impedem em grande medida a utilização do sistema em ambientes interiores, uma fonte significativa de incorreções reside no desfasamento temporal entre os relógios dos recetores – um desfasamento de $1\ \mu\text{s}$ implica, pela elevada velocidade de propagação, que a distância entre o recetor e o satélite sofra uma variação de 300 metros. Uma forma de eliminar este problema implicaria um investimento in comportável, com vista a que todos os recetores estivessem equipados com relógios de elevada precisão (e nem esses se encontram imunes a pequenos erros), pelo que a solução encontrada foi o aumento do número de satélites para restringir as probabilidades de erro na estimativa da posição. Ainda que em menor escala, o desfasamento entre os relógios atómicos dos diversos satélites é também uma limitação. Por muito precisos que estes sejam, pequenos desfasamentos são com o passar do tempo acentuados, o que leva a perdas importantes de precisão e obriga a um periódico procedimento de sincronização [25].

Por forma a melhorar o desempenho do sistema em situações de degradação do sinal surgiu o *Assisted GPS* (A-GPS), um sistema utilizado em dispositivos móveis equipados com recetores GPS que combina o sistema tradicional com outras informações de localização, obtidas recorrendo a um servidor externo e aos sinais emitidos pelas estações das operadoras de rede GSM, também equipadas com recetores GPS. Quando o dispositivo móvel pretende obter a sua localização, os dados GPS são transferidos para este a partir da estação-base, sendo utilizados como referência para melhorar o processo, o que resulta numa maior rapidez na localização dos satélites e num aumento da precisão das estimativas, tornando possível o funcionamento do sistema em situações onde o nível do sinal é normalmente insuficiente para fazer o sistema tradicional funcionar corretamente [27, 28].

A disseminação do GPS atingiu uma tal proporção que atualmente a sua utilização em dispositivos móveis é quase banal, encontrando-se num vasto número de aplicações, conjugado com diversas outras tecnologias. Só nos EUA, entre 2005 e 2010, a comercialização de aparelhos GPS gerou lucros de 49.57 milhões de dólares, o equivalente na altura a cerca de 38 M€, e segundo previsões a nível global da *Market Research* para 2013 o número de dispositivos com sistema GPS (ou associados) atingiu os 900 milhões, originando lucros de quase 8 000 M€ [29].

GLONASS

O *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) é o sistema de navegação por satélite russo criado pela *Russian Aerospace Defense Force*, alternativo ao norte-americano GPS. Criado em 1976, em plena Guerra Fria, com o objetivo de obter cobertura global no horizonte de década e meia para uso militar, foi inicialmente vítima de diversos avanços e recuos por parte da liderança comunista da então União Soviética. Com o colapso sofrido pela economia russa após a desintegração da URSS, o sistema sofreu uma degradação gradual, com o culminar do ciclo de vida de satélites já lançados em órbita. Assim se justifica que depois de já no novo século o estado russo se ter lançado num ímpeto definitivo para

restaurar o sistema, o GLONASS englobe ainda duas gerações de satélites, de diferentes idades e sobretudo com diferente desempenho: os *Glonass-M*, lançados a partir de 2003, e os *Glonass-K*, lançados em 2011, quando o sistema se tornou operacional a nível global.

O sistema é constituído no total por 28 satélites, dos quais 24 se destinam à transmissão de sinal, divididos por três planos orbitais equidistantes com oito satélites cada que orbitam a uma altitude de aproximadamente 19 100 *km*. Os satélites orbitam, assim, a menor altitude que os satélites GPS, o que possibilita que completem uma volta em torno da Terra em 11 horas e 15 minutos, menos 43 minutos que os satélites norte-americanos. Os três planos orbitais formam entre si ângulos de 120° e possuem uma inclinação de 64.8°, o que se constitui como outra vantagem em relação ao sistema GPS, cuja inclinação do plano orbital é de aproximadamente 55°, como foi referido acima. Pelo facto de a inclinação ser superior, os satélites GLONASS orbitam com maior proximidade aos polos terrestres, permitindo uma melhor cobertura nessas áreas [30].

Os satélites GLONASS transmitem dois tipos de sinais, mas apenas um se encontra disponível para usufruto público, os *Standard Precision*. Os outros, de maior precisão (*High Precision*), são utilizados apenas para fins militares. A codificação dos sinais emitidos pelos satélites é universal, mas cada satélite transmite segundo a sua própria frequência, derivada a partir de um de três relógios atómicos de 5 *MHz*. As frequências de referência são de 1602 *MHz* (L1), 1246 *MHz* (L2) e 1201 *MHz* (L3).

Pela razão de o GLONASS se encontrar ainda num processo de modernização que demorará mais alguns anos a ficar concluído, o sistema russo perde na comparação com o GPS no nível médio de precisão: enquanto que o GPS consegue detetar uma posição que tenha um nível ideal de exposição em 3 a 4 metros, no GLONASS a precisão piora para 7 a 10 metros [31]. Esta diferença de performance tenderá a ser atenuada num futuro próximo, ainda que as atuais discrepâncias entre os dois sistemas não sejam de primordial importância para o utilizador comum, dado que os recetores são capazes de captar os dois sinais em simultâneo e, assim, beneficiar das melhores características de ambos. Paralelamente espera-se que mais dois sistemas de navegação por satélite atinjam cobertura global: o chinês *BeiDou* (BDS) e o europeu *Galileo*, que se encontra num estado mais avançado e cujos primeiros testes, realizados com apenas quatro satélites, permitem já vislumbrar uma performance superior quando conjugado com os sistemas GPS ou GLONASS [32]. A infraestrutura orbital do *Galileo* deverá contar com 30 satélites instalados a uma altitude superior a 23 000 *km*, sendo esta maior altitude compensada com um número de satélites também superior. Desta forma, em qualquer ponto do globo será possível receber o sinal proveniente de seis a oito satélites pertencentes aos três sistemas em funcionamento, o que permitirá obter níveis de precisão na ordem dos centímetros [33], abrindo a porta a todo um novo leque de possibilidades.

2.3.2 Redes de Sensores sem Fios

RADAR

O RADAR [34] foi o primeiro sistema de localização baseado em redes WLAN e, ainda que a sua criação remonte ao ano 2000, os seus níveis de desempenho são ainda hoje

idênticos aos dos sistemas mais recentes. Incorpora apenas localização a duas dimensões e está implementado na banda livre dos 2.4 GHz , similar à da tecnologia *Wi-Fi*, utilizando os *access points* da rede. A comunicação assenta no envio de pacotes UDP (*User Datagram Protocol*) de 6 bytes com um período de 4 segundos e a localização é calculada a partir da leitura e conversão do RSSI dos *access points* mais próximos, seguindo-se, quando necessária, uma análise da envolvente antes da aplicação da técnica de triangulação. O RADAR consegue um erro inferior a 2.94 m em 50% dos casos e a 4.69 m em 75%, quando aplicado com o auxílio de três *access points* numa área de $44 \times 23\text{ m}$.

Lai & Cheng Location System (RFID)

A alternativa apresentada em [35] utiliza uma rede de sensores sem fios, com leitores RFID (*Radio-Frequency Identification*) de 2.45 GHz , para processar o posicionamento de um objeto equipado com um *tag*. Os leitores, após efetuarem a identificação com o *tag*, enviam dados para um conjunto de servidores que se encontram alojados numa *cloud*, através de redes com ou sem fios. Para garantir bons índices de cobertura de sinal, as posições dos leitores são ajustadas com base na avaliação prévia das suas próprias características de transmissão. Os dados alojados são, depois, utilizados para implementar um modelo de localização, originalmente calibrado num ambiente *indoor*, que recorre ao RSSI e ao indicador de qualidade do sinal (LQI) para calcular a distância entre o objeto e os diversos leitores RFID, e obter a sua posição com um erro máximo de um metro.

iBeacon (BLE)

O *iBeacon* [36] é uma implementação baseada na tecnologia *Bluetooth Low Energy*, levada a cabo pela *Apple*, com o fim de desenvolver um sistema de localização *indoor* com aplicações de proximidade. O objetivo reside na identificação de pontos de interesse e na apresentação, numa aplicação para dispositivos móveis, de informações referentes aos mesmos através de uma avaliação da proximidade do utilizador, determinada através da posição dada por um conjunto de pequenos transmissores BLE de baixo custo, denominados de *iBeacons*. Por outras palavras, o objetivo não é fazer a localização do utilizador num edifício, mas sim dar-lhe a possibilidade de receber alertas referentes às proximidades do local em que se encontra. Lançado em dezembro de 2013, o sistema *iBeacon* traçou rapidamente o seu caminho para a massificação e é atualmente empregue em diversos serviços ou mesmo em sistemas de localização propriamente ditos como o *MPact* da *Motorola* [37].

Um *iBeacon* pode ser identificado através de três identificadores universais (UUIDs), *Proximity* (128 bits), *Major* e *Minor* (16 bits), o que permite a escalabilidade dos *beacons* em áreas onde a densidade de potenciais alvos informativos seja elevada (museus, centros comerciais, etc.).

Uma das principais vantagens do *iBeacon* reside no baixo consumo de energia, um pergaminho da tecnologia BLE que permite que a aplicação, caso tal seja desejado, se mantenha permanentemente em atividade. Não obstante, o sistema também é bastante competitivo no cálculo de distâncias. Quando a aplicação *iBeacon* se encontra em primeiro

plano, o serviço *Core Location* da *Apple* realiza uma estimativa da proximidade do *beacon* mais próximo, através da intensidade do sinal (RSSI), e avalia-o na seguinte escala:

- Imediato (até 50 centímetros);
- Próximo (entre os 50 centímetros e 2-5 metros);
- Afastado (entre os 2-5 e os 30-50 metros).

Esta escala não é fixa, devido às diversas condicionantes subjacentes à propagação do sinal em ambientes interiores. Por esta razão, o sistema introduz artificialmente um atraso temporal, para que o dispositivo não transite sistematicamente entre duas regiões enquanto se desloca junto à fronteira entre ambas. Desta forma, um evento que indique a saída de uma determinada região é automaticamente descartado caso um evento de entrada na mesma região ocorra nos segundos seguintes.

Hazas & Hopper Location System (Ultrassons)

Dos sistemas por ultrassons destaca-se o modelo descrito em [38], um sistema tridimensional de curto alcance criado por M. Hazas e A. Hopper que utiliza um conjunto de transdutores ultrassónicos. Possui dois modos de operação, centralizado e privado: no modo centralizado, o conjunto de transmissores é disposto em rede num determinado espaço e transmite simultaneamente um pulso ultrassónico, por sua vez captado por um serviço central que estima a localização das unidades móveis através da técnica de *time of flight*. No modo privado, é importante que as mesmas unidades não sejam obrigadas a emitir qualquer sinal que possa ser detetado e, por isso, é necessário que o dispositivo consiga obter a sua localização por si próprio, o que implica que os transdutores da rede, que transmitem simultaneamente pulsos ultrassónicos, estejam localizados em posições fixas e conhecidas.

Este sistema apresenta índices de precisão significativamente melhores que os restantes apresentados, de 2.1 *cm* na variante centralizada e variando entre os 5 e os 25 *cm* no modo privado (com uma margem de confiança de 95%), e pode ser incorporado noutros sistemas, em situações nas quais seja necessária uma maior pormenorização, graças à sua escalabilidade. Outras soluções de localização envolvendo ultrassons encontram-se também enunciadas em [38].

Ubisense (Ultrawideband)

O *Ubisense* [39] é uma solução de localização criada pela universidade inglesa de Cambridge, que consiste num conjunto de dispositivos (*tags*) que emitem pulsos UWB numa rede de sensores de referência, programados via *Ethernet* ou *Wi-Fi* e colocados numa infraestrutura fixa que recebe os sinais emitidos. Os *tags* possuem um transmissor UWB de frequência variável entre os 6 e os 8 *GHz* e um transceptor rádio de 2.4 *GHz*, que permite a troca bidirecional de mensagens de controlo com os sensores no sentido de maximizar

o tempo de vida das baterias. Cada sensor de referência deteta o AoA do sinal emitido através de um *array* de antenas e, caso os sensores se encontrem sincronizados entre si, aliam também a técnica de TDoA no cálculo da localização do *tag*. Com a combinação destas duas técnicas é possível obter uma precisão que supera os 30 centímetros.

2.3.3 Outros sistemas

MaWi (Wi-Fi)

Em [40] apresenta-se o *MaWi*, um sistema de localização *indoor* baseado num método de estimação sequencial de Monte Carlo (também denominado de *Particle Filter*) que combina o *fingerprinting* da tecnologia *Wi-Fi* com a intensidade do campo magnético. Funciona graças a um sistema composto por dois tipos de utilizadores, os que fornecem os *fingerprints* de uma determinada área para uma base de dados e os que necessitam de localização nessa mesma área. Após receber um pedido de localização, o filtro dimensiona o *fingerprint* a partir da base de dados e calcula a localização do dispositivo na área anteriormente rastreada.

O ponto fulcral do *MaWi* reside na simplicidade do processo de recolha de informações para projetar o *fingerprint*. Inicialmente, o fornecedor indica antecipadamente o trajeto que vai percorrer. Durante o percurso, assumindo que o fornecedor se desloca em movimento uniforme (a velocidade constante) de 1 *m/s*, e sabendo que as frequências máximas de obtenção de dados *Wi-Fi* de um *smartphone* e de um magnetómetro são, respetivamente, de 0.33 *Hz* e de 5 *Hz*, como

$$d = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

os *fingerprints* são gravados, respetivamente, a cada 3 e 0.2 metros. As verificações realizadas demonstraram que tal leva a que seja necessária apenas uma hora para que uma área de 22 500 *m*² seja mapeada com elevada precisão.

Localização através da rede GSM

Desde o lançamento na *UbiComp*, em 2005, de um sistema baseado na rede GSM [21] capaz de atingir estimativas com uma margem de erro entre os 2.5 e os 5 metros, a performance dos sistemas baseados nas redes de comunicação móvel não conheceu uma progressão muito significativa. Este sistema, que tem ainda assim vindo a ser adaptado ao longo dos anos, destaca-se pela utilização de todas as células GSM disponíveis (cuja potência de sinal seja suficiente para ser detetada) para dimensionar o *fingerprint*, o que melhora a precisão do sistema em cerca de 50% relativamente a sistemas que apenas fazem uso das seis células mais próximas.

As redes de comunicação móvel são, de resto, mais frequentemente associadas a sistemas de localização *outdoor*, dos quais é exemplo o sistema descrito em [41], que apesar de calcular localizações com erros na ordem dos 50 a 100 metros (bastante elevados, mas compreensíveis dada a área usualmente coberta por cada estação-base) possui a particularidade de realizar a divisão da área a mapear e de utilizar uma Cadeia Oculta de Markov,

para que a estimativa seja baseada no histórico das células associadas e na sua força de sinal, uma abordagem que pode ser escalada noutro tipo de aplicações e tecnologias com resultados mais positivos.

2.4 Técnicas de Filtragem de Dados

No domínio da obtenção de dados, uma das maiores dificuldades encontra-se na eliminação do ruído subjacente às medições. No caso específico de aplicações relacionadas com posicionamento e localização, os dispositivos que normalmente efetuam a medição estão normalmente corrompidos por um elevado nível de ruído, que é tendencialmente superior quanto maior for a quantidade de objetos interferentes à sua volta. Historicamente, a aplicação bem sucedida de processos deste tipo pressupunha um grau de dificuldade considerável, pelo que a procura por soluções eficientes que levem à atenuação dos níveis de ruído remonta já ao início da segunda metade do século XX [42]. Da vasta sucessão de soluções de filtragem linear e recursiva que desde então surgiram, explicitadas em [43], destaca-se a de Kalman e uma sua derivação, o filtro *Alpha-Beta*. O filtro *Alpha-Beta* evidencia-se pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, enquanto que um filtro de Kalman simples conjuga duas características de significativa valia – uma menor complexidade quando comparado com filtros de maior eficácia e robustez, como o *Extended Kalman Filter* ou o *Growing Memory Alpha-Beta Filter* (GMAB), o que torna mais fácil a implementação de algoritmos de localização complexos, bem como um menor tempo de estabelecimento em relação a filtros mais simples como os *Alpha-Beta* [44].

2.4.1 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um algoritmo de estimação recursivo aplicado a sistemas dinâmicos de tempo real com uma associada perturbação aleatória. Pela sua eficácia e complexidade, é um dos mais conhecidos e utilizados algoritmos matemáticos de filtragem, sendo utilizado num vasto leque de aplicações que inclui áreas tão distintas como a automação industrial, a navegação por satélite, balística, aeronáutica ou outros sistemas de controlo [43]. A sua principal virtuosidade recai no aproveitamento de grande parte das características do sistema, nas quais se incluem as condições iniciais e o ruído associado às medições efetuadas, e no conhecimento da sua dinâmica para construir as estimativas [45].

O filtro de Kalman é baseado em sistemas lineares discretos no tempo e assume que as medições são afetadas por ruído gaussiano branco, que não está correlacionado temporalmente, pelo que, para cada instante temporal discretizado, se pode assumir que o nível de ruído associado ao sistema e às medições é independente dos níveis de ruído noutros instantes de medição. O *modelo de transição* do filtro baseia-se na equação matricial

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (2.2)$$

na qual x_k representa o vetor de amostras que se pretende estimar, x_{k-1} o estado anterior do vetor, u_k as variáveis de controlo e w_k o ruído associado ao processo, que se assume

seguir uma distribuição Gaussiana de covariância Q_k e média nula; F_k e B_k são matrizes que contêm, respetivamente, as características de transição (das variáveis que afetam o funcionamento) do sistema e do seu modelo de controlo.

Por outro lado, um conjunto de novas medidas z_k pode ser definido pelo *modelo de observação* como

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2.3)$$

onde a matriz H_k é a matriz de observação e v_k é o ruído associado à medição, que novamente se pressupõe ser gaussiano branco de covariância R_k e média nula.

O funcionamento do filtro de Kalman pode ser dividido em duas etapas: numa primeira fase, o filtro produz uma estimativa futura dos parâmetros do sistema, no que na língua inglesa se designa por *Prediction*. De seguida, os parâmetros calculados são utilizados pelo filtro para, a partir das medições efetuadas anteriormente, calcular uma nova estimativa da medição pretendida (*Update*) [46]. O estado do filtro em cada instante é definido pelas seguintes variáveis:

- \hat{x}_k , a estimativa da medição no instante k ;
- P_k , a matriz de covariância do ruído, um indicador da incerteza associada à medição estimada.

As equações de previsão e atualização, deduzidas em [47] e [48] a partir das equações 2.2 e 2.3, sintetizam-se na tabela 2.2. K_k é o ganho ótimo de Kalman associado à medição e é função da matriz S_k , o residual da matriz de covariâncias na qual está contida a covariância do ruído associado à medição R_k . Por questões de simplificação da notação, as variáveis sobrepostas por um sinal '-' são estimadas *a priori*, enquanto que as denotadas por um sinal '+' se tratam de estimativas *a posteriori*.

<i>Prediction</i>	<i>Update</i>
$\hat{x}_k^- = F_k \hat{x}_{k-1}^+ + B_k u_k$ $P_k^- = F_k P_{k-1}^+ + Q_k$	$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$ $P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^-$ $K_k = P_k^- H_k^T S_k^{-1}$ $S_k = H_k P_k^- H_k^T + R_k$

Tabela 2.2: Equações de previsão e atualização do filtro de Kalman.

Numa aplicação prática do filtro de Kalman, a covariância do ruído provocado pelas medições, R , pode ser estimada com um grau de exatidão satisfatório através da medição de um conjunto de amostras da variável que se pretende filtrar. No entanto, a covariância do ruído do processo Q é muito mais difícil de estimar na maior parte das situações – a existência de múltiplas fontes de ruído no ambiente em que um processo é executado torna

muitas vezes impossível, pelo menos quantitativamente, a avaliação do nível de ruído a este associado. Um modo eficaz (ainda que moroso e menos exato) de obter uma estimativa do valor de Q é realizar o *tuning* da variável, testando o filtro com diferentes valores até que se encontre aquele que induz a resposta mais satisfatória. Ainda assim, é necessário ter em conta que em determinadas aplicações (como é o caso das que incluem a utilização de sensores) a variação do nível de ruído é uma consequência imediata da alteração de variáveis que estão estreitamente ligadas à dinâmica do sistema, como sejam a distância em sensores de posição ou a temperatura nos sensores de pressão. Tal leva a que os parâmetros possam não ser constantes, o que dificulta a sua estimativa [46].

2.4.2 Filtros *Alpha-Beta*

Descrita pela primeira vez por Sklansky em 1957 e alvo de diversas atualizações desde então, a variante de filtros *alpha-beta* segue os mesmos princípios dos algoritmos de filtragem de Kalman, mas apresenta como principais vantagens a sua simplicidade e o facto de ser computacionalmente mais leve, o que a torna indicada para aplicações de baixa potência [49].

O filtro *alpha-beta*, de segunda ordem, pressupõe que um sistema unidimensional pode ser adequadamente simulado por um modelo com duas variáveis, em que a segunda é obtida por derivação da primeira [42]:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Este estado bidimensional possui uma equação de propagação modelada por uma série de Taylor da forma

$$x_{k+1} = \Phi(k+1, k) x_k + \omega_k \quad (2.5)$$

onde ω_k representa o ruído do processo, de média nula e covariância Q , e

$$\Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

em que T representa o período de amostragem.

Tal como acontece no algoritmo de Kalman, o filtro *alpha-beta* calcula *a priori* uma estimativa do valor da amostra no instante k , x_k^- :

$$x_k^- = x_{k-1}^+ + T \dot{x}_{k-1}^+ \quad (2.7)$$

O valor da amostra, calculado *a posteriori*, resulta de uma média ponderada entre a estimativa realizada *a priori* e uma nova medição realizada, z_k :

$$x_k^+ = x_k^- + \alpha(z_k - x_k^-) \quad (2.8)$$

Derivando a equação 2.8 obtém-se a atualização da segunda variável de estado:

$$\dot{x}_k^+ = \dot{x}_{k-1}^+ + \frac{\beta}{T}(z_k - x_k^-) \quad (2.9)$$

Os valores de α e β devem ser dimensionados por forma a não comprometer a estabilidade do filtro, nem aumentar de sobremaneira os níveis de ruído. Da análise realizada em [50] conclui-se que o filtro possui a equação característica

$$z^2 + (\alpha + \beta - 2)z + (1 - \alpha) = 0 \quad (2.10)$$

pelo que, aplicando os critérios de estabilidade, se retira que o filtro é estável para valores de α e β que respeitem a condição

$$\beta > 0 \wedge 2\alpha + \beta < 4 \wedge 0 < \alpha < 2$$

O filtro *alpha-beta* pressupõe que a segunda derivada da variável x se mantém constante ao longo da medição. Num algoritmo de localização, seria o equivalente a um corpo se deslocar em movimento uniforme, com aceleração nula. Se tal não for o caso deve, como alternativa, utilizar-se a variação de terceira ordem do filtro, denominada de *alpha-beta-gamma*.

Por comparação com o filtro de Kalman, o filtro *alpha-beta*, apesar de requerer um esforço computacional inferior, revela uma maior ineficácia na filtragem de dados. O tempo de estabelecimento da resposta (em 90% do valor final), bem como o erro estacionário à mesma associado, são superiores ao do filtro de Kalman. Esta lacuna acentua-se na globalidade do processo com a variação dos níveis de ruído – a diminuição do tempo de convergência para valores próximos dos do filtro de Kalman implica um aumento incontrolável do erro associado à medição, e tal ocorre de forma similar na situação inversa [44]. Isto leva a que, em situações de transmissão de dados, o filtro *alpha-beta* apenas consiga manter um desempenho semelhante ao de Kalman quando transmissor e recetor se encontrem numa situação de proximidade e em linha de vista [51].

Capítulo 3

Descrição do Sistema

3.1 Princípio de Funcionamento

O sistema *TLS - Thesis Location System* é constituído, em linhas gerais, por uma rede de transmissores, dispostos numa determinada área, que comunicam com um dispositivo móvel localizado nas suas proximidades através da tecnologia *Bluetooth Low Energy*. A interface com o utilizador é realizada através de uma aplicação *Android* previamente instalada no dispositivo, a *TLSApp*, concebida para o efeito e que permite o seguimento da posição periodicamente ou em tempo real, de acordo com as pretensões do utilizador. O processo de localização pode ser descrito como possuindo três fases: primeiro, o dispositivo verifica a existência de sinais transmitidos pelos *beacons* LE nas suas proximidades e, caso existam, mede o RSSI de cada um dos sinais recebidos ao mesmo tempo que recebe o identificador universal de cada um deles. Os transmissores encontram-se em posições fixas, de coordenadas (latitude/longitude) conhecidas e previamente armazenadas numa base de dados alojada *online*. Se existir a necessidade de alterar a posição de um transmissor na base de dados, esta pode ser configurada recorrendo a uma plataforma *web* acessível ao utilizador. Depois de recolher o identificador e respetiva força de sinal de cada um dos transmissores, a aplicação acede à base de dados remota para, a partir da identificação, ler a latitude e a longitude dos mesmos, ao mesmo tempo que converte, através de um modelo de propagação de sinal, o RSSI na distância que separa cada transmissor do dispositivo. Após a obtenção destes dados a aplicação está em condições de aplicar um algoritmo de localização que determina a posição do dispositivo.

3.1.1 Características do sistema

Como delineado nos objetivos desta dissertação, um dos propósitos do projeto era explicar o funcionamento de uma tecnologia recente e pouco explorada. Após ter sido realizado um levantamento de tecnologias alternativas, a localização por *Bluetooth Low Energy* afigurou-se como uma janela de oportunidade, visto ser já utilizada em aplicações do género, mas sobretudo com uma vertente de identificação comercial associada e não tanto em sistemas de localização efetivos e de elevada precisão.

3. Descrição do Sistema

Pela descrição introdutória é perceptível que a utilização deste sistema, pela necessidade da implementação de uma rede de transmissores, não pode ser realizada num âmbito verdadeiramente global. De facto, dado o reduzido alcance das ligações BLE, não é possível consegui-lo utilizando esta tecnologia. No entanto, a particularidade de os transmissores estarem previamente *equipados* com coordenadas GPS fixas leva a que este sistema de âmbito local funcione como um *GPS artificial*, capaz de ser facilmente incluído no sistema original. Dadas as características da tecnologia utilizada na interligação entre os diferentes blocos do sistema, o consumo energético dos transmissores que compõem a rede é reduzido [15, 52] e o facto de a localização dos *tags* poder ser alterada com facilidade confere também ao sistema uma elevada escalabilidade. Em sentido contrário, a utilização de uma rede de transmissores implica sempre um aumentar por vezes substancial dos custos: quanto maior o número de *beacons* utilizado para mapear uma determinada área, maior a precisão do sistema. Além disso, são necessários cuidados especiais na fixação dos módulos e na recolha das suas coordenadas que deve ser o mais precisa possível, sendo aconselhável o recurso a instrumentos adequados para o efeito sob pena de serem induzidos erros de precisão sistemáticos. O mapeamento da distância em função da potência de sinal recebida pelo dispositivo deve ser realizado a partir de medições do RSSI em vários pontos a diferentes distâncias, retirando-se em cada ponto um conjunto de medidas (pelo menos dez para diminuir o efeito de erros isolados na sua obtenção) e realizando-se a média das mesmas arredondando o valor final para um número inteiro. Os resultados dão origem a uma relação matemática que evidencia a relação constituída.

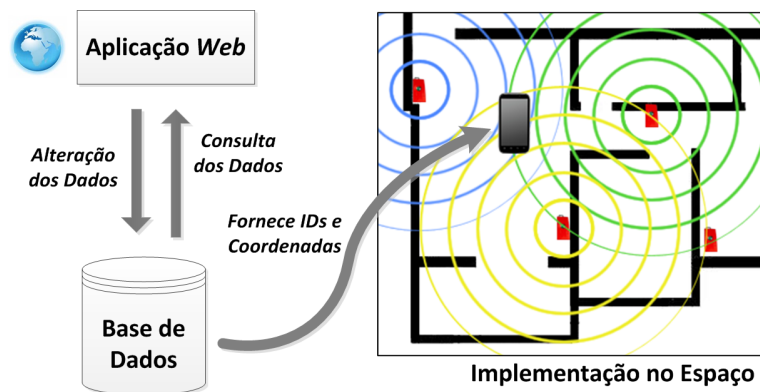


Figura 3.1: Arquitetura do sistema.

O sistema implementado reúne ainda uma especificidade importante: a escolha dos *sensor nodes* que contribuem para a estimativa da localização do dispositivo é baseada num fator de proximidade, ou seja, a posição é calculada a partir dos transmissores cujo sinal de reconhecimento é recebido com maior potência pelo dispositivo, o que implica uma redução no erro associado. Adicionalmente, e mesmo que a sensibilidade dos recetores varie de modelo para modelo, no caso de o dispositivo receber por parte de um desses transmissores um sinal de potência inferior à sua sensibilidade, a medição não pode ser considerada válida sob pena de o erro à mesma associado não ser negligenciável.

3.2 Hardware

O sistema apresentado propõe a disposição de uma série de transmissores que emitem um sinal de presença. Pela necessidade de disseminar uma significativa quantidade de dispositivos por um conjunto de espaços, a escolha do módulo transmissor teria que recair num objeto de pequena dimensão e tendencialmente de baixo custo, ainda que o trabalho pudesse funcionar apenas como prova de conceito. Inicialmente, quando as bases do projeto ainda não se encontravam completamente definidas, pensou-se que em vez dos dispositivos existentes no mercado capazes de funcionar como *beacons* seria pertinente utilizar um módulo mais completo, com outro tipo de valências, capaz de adicionar novas soluções ou colmatar falhas no sistema com a existência de instrumentos adicionais.

Nesse sentido, o *CC2541 SensorTag Development Kit* é um *kit* de desenvolvimento criado pela *Texas Instruments* (TI) cujo padrão de comunicação se baseia na tecnologia BLE. Possui um vasto conjunto de ferramentas para construção de aplicações, das quais se destaca um conjunto de sensores capaz de obter leituras de temperatura e humidade, bem como um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro que podem ser bastante úteis numa perspetiva de localização. O *SensorTag* afigurou-se como uma opção fiável e completa e, não obstante o custo elevado de cada unidade (cerca de 23 €), acabou por ser escolhido como módulo experimental, ainda que numa implementação comercial fosse de considerar a escolha de outro módulo mais barato ou a conceção de um módulo próprio, de menor custo, incorporando as funcionalidades que fossem desejadas.

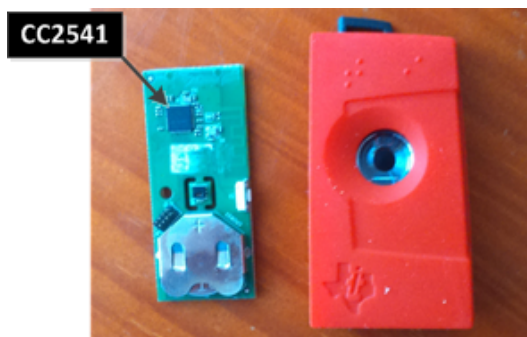


Figura 3.2: *SensorTag*.



Figura 3.3: Módulo CC2541. [52]

Os sensores que compõem o módulo encontram-se diretamente acessíveis pelo servidor GATT, através de um serviço de pesquisa pelo seu identificador universal (UUID). No servidor GATT dos *SensorTag* cada sensor possui um serviço, constituído por um total de 11 características que servem como interface para troca de informações. Destacam-se três: uma (com permissão unicamente de leitura) permite ler os valores fornecidos pelo sensor, enquanto que as duas outras, com propósitos de configuração (e permissão de leitura e escrita), permitem respetivamente ativar/desativar o sensor e alterar o seu período de medição, sendo necessário proceder à ativação do sensor por esta via antes de ler os dados que são debitados. Além dos serviços destinados aos sensores existem adicionalmente mais três, que permitem o acesso a informações relativas ao dispositivo.

A interface com o exterior é realizada através do barramento I²C e o processamento da informação proporcionada é efetuado por um módulo *SoC* (*System-on-a-Chip*), o *CC2541* [52], que funde um transceptor rádio com um microcontrolador 8051. Está dotado de uma memória programável de 256 *kB*, uma memória RAM de 8 *kB* e muitas outras funcionalidades, entre as quais se incluem duas USARTs e uma ADC de 12 bits. O módulo rádio opera na banda ISM de 2.4 *GHz* e pode ser configurado para taxas de transmissão de 250 *kbps*, 500 *kbps*, 1 e 2 *Mbps*; para uma taxa de transmissão de 1 *Mbps* (modo LE), o módulo apresenta uma sensibilidade de -88 *dBm*. Os baixos custos energéticos são também uma característica bem presente: os sensores estão desativados por defeito e suspendem o seu funcionamento no período entre medições consecutivas. O resultado é um consumo máximo na transmissão de 18.2 *mA*, com uma tensão de alimentação de 3 *V*, que ocorre quando o *SoC* transmite à potência máxima de 0 *dBm* (o que revela, no entanto, uma baixa eficiência), enquanto que os consumos mínimos de 0.5 μ A são atingidos em situações de inatividade da unidade de controlo (MCU), no *Power Mode 3*. A potência do sinal transmitido pelo *SensorTag* é, de resto, programável até a um mínimo de -23 *dBm* (originalmente a transmissão é feita à potência máxima).

Por defeito, o *SensorTag* faz-se anunciar com um período de 100 *ms*, podendo os períodos de medição dos dados dos sensores variar entre tempos tão díspares como os 7.5 *ms* e os 4 *s*. Estes tempos podem ser alterados recorrendo ao servidor GATT, dentro de um intervalo de valores que difere, contudo, de sensor para sensor. Por questões de poupança de energia, uma particularidade relevante, mas nem sempre bem recebida pelos utilizadores, reside nos módulos suspenderem automaticamente a sua operação ao fim de 180 segundos, o que limita a sua utilização nas próprias aplicações para que são designados (que requerem significativos e prolongados esforços de medição), sendo necessária a alteração do *firmware* para contornar esta situação.

Para simplificar a leitura dos próximos capítulos desta dissertação, a partir deste ponto do documento convencionou-se designar os dispositivos *SensorTag* apenas como *tags* ou *sensores* – não confundir com os sensores que integram o módulo –, assumindo-se a consequente perda de precisão linguística.

3.3 Algoritmo de Localização

O algoritmo de localização dos dispositivos integrados no sistema baseia-se na técnica de trilateração referida na subsecção 2.1.1 e permite apenas o cálculo de posições a duas dimensões, dada a inclusão da terceira dimensão, correspondente à altura, implicar a derivação de fórmulas bastante mais complexas. Esta escolha pode, no entanto, constituir-se como uma limitação, porque esta omissão impede a correta assunção das distâncias no caso de o RSSI não ser constante no plano espacial, como se verificará adiante. De resto, a determinação do número do andar em edifícios com múltiplos pisos, outra funcionalidade relevante do TLS, não seria realizável por via da adição da terceira dimensão ao processo, devido à existência de uma fronteira física entre espaços de diferentes andares, pelo que a solução encontrada para manter esta funcionalidade no sistema consiste na obtenção da

informação referente ao sensor tido como mais próximo.

Assume-se um referencial cartesiano de coordenadas (x, y) centrado na posição do sensor cuja potência de sinal recebida pelo dispositivo seja superior (o mais próximo), que no decurso desta derivação se classifica como ponto A. O posicionamento dos outros dois sensores, nos pontos coordenados B e C, segue igualmente a ordem decrescente do nível de potência e é calculado relativamente ao sensor localizado no ponto A, o que alivia o esforço computacional exigido pela constante execução do algoritmo.

$$(x_A, y_A) = (0, 0) \quad (3.1)$$

Considerem-se assim as coordenadas dos pontos B e C, (x_B, y_B) e (x_C, y_C) , e ainda a distância de cada um dos sensores ao dispositivo, calculada a partir da medição do RSSI, r_A , r_B e r_C . A circunferência de raio r_i e centro em (x_i, y_i) formada por cada sensor pode ser representada pela equação:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r_i^2 \quad (3.2)$$

Deste modo, o ponto P (x, y) onde o dispositivo se encontra tem que obedecer à tripla condição seguinte:

$$x^2 + y^2 = r_A^2 \quad \wedge \quad (3.3)$$

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = r_B^2 \quad \wedge \quad (3.4)$$

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = r_C^2 \quad (3.5)$$

Pegando em primeiro lugar na equação 3.3 temos que

$$x = \pm \sqrt{r_A^2 - y^2}, \quad r_A^2 \geq y^2 \quad (3.6)$$

Assumindo um valor positivo para o resultado de x (o desenvolvimento do algoritmo para valores negativos é análogo), desenvolve-se de seguida a equação 3.4:

$$\begin{aligned} & (\sqrt{r_A^2 - y^2} - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = r_B^2 \Leftrightarrow \\ & r_A^2 - y^2 - 2\sqrt{r_A^2 - y^2} x_B + x_B^2 + y^2 - 2y y_B + y_B^2 = r_B^2 \Leftrightarrow \\ & -2\sqrt{r_A^2 - y^2} = \frac{2y y_B - x_B^2 - y_B^2 - r_A^2 + r_B^2}{x_B} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Da mesma forma, o desenvolvimento da equação 3.5 conduz à igualdade

$$-2\sqrt{r_A^2 - y^2} = \frac{2y y_C - x_C^2 - y_C^2 - r_A^2 + r_C^2}{x_C} \quad (3.8)$$

pelo que

$$x_B(2y y_C - x_C^2 - y_C^2 - r_A^2 + r_C^2) = x_C(2y y_B - x_B^2 - y_B^2 - r_A^2 + r_B^2) \quad (3.9)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem a y obtém-se

$$y = \frac{Dx_B + Ex_C}{2(y_Bx_C - y_Cx_B)}, \quad (3.10)$$

onde

$$\begin{aligned} D &= r_C^2 - y_C^2 - r_A^2 - x_C^2 \\ E &= -r_B^2 + y_B^2 + r_A^2 + x_B^2 \end{aligned}$$

Por consequência, retira-se x como função de y reutilizando os resultados obtidos nas equações 3.6 e 3.7:

$$x = \frac{-2y_B y + E}{2x_B} \quad (3.11)$$

O algoritmo permite fazer a estimativa da posição de um equipamento apenas quando este se encontrar na área delimitada pelos três sensores, mas note-se que as estimativas calculadas pelo mesmo só serão válidas se obedecerem à condição da equação 3.6, que simplificada se torna $|r_A| \geq |y|$ – ou seja, quando a circunferência com centro no ponto A, onde se localiza o sensor teoricamente mais próximo, se intersetar com pelo menos uma das outras duas circunferências. Caso a existência de erros de medição implique que a interseção seja feita com apenas uma delas, a medição manter-se-á válida, mesmo que o erro da estimativa seja superior, fruto do desfaseamento da terceira circunferência. Contrariamente, mesmo que as circunferências relativas aos sensores mais afastados se intersetem entre si sem que nenhuma delas faça o mesmo com a do sensor mais próximo, a estimativa é considerada inválida, o que resulta de uma imposição matemática do algoritmo mas é compreensível neste contexto: a distância mais próxima é primordial por ser a mais fidedigna.

3.4 Base de Dados e *Host* Remoto

A base de dados foi criada num *host*, no caso o *000webhost* [53], permitindo a sua utilização de forma remota, e encontra-se assente no sistema de gestão *open-source MySQL*. A razão de tal escolha prende-se com a simplicidade e a eficiência da plataforma quando comparada com outras plataformas existentes, proporcionando mecanismos de escalabilidade na resposta a números significativos de acessos, o que traz vantagens do ponto de vista da implementação do sistema em múltiplos ambientes [54]. Possui limitações, nomeadamente no tratamento de aplicações mais complexas, mas dado que o uso que se pretende dar à base de dados, descrito seguidamente, é relativamente simples, o *MySQL* é provavelmente a melhor alternativa.

A base de dados é essencialmente constituída por duas tabelas. No âmbito de uma das interfaces com o utilizador previstas para o sistema, detalhadas proximamente na secção 3.5, a necessidade de implementação de um sistema de *login* implicou a existência de uma tabela secundária de forma a armazenar todos os dados referentes às diferentes contas de

utilizador. A tabela principal armazena os dados referentes aos sensores, e as suas entradas seguem uma mesma estrutura:

```
1 CREATE TABLE IF NOT EXISTS 'dados_sensores' (  
2   'sensor_id' varchar(30) DEFAULT NULL,  
3   'latitude' double DEFAULT NULL,  
4   'longitude' double DEFAULT NULL,  
5   'storage_date' timestamp DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,  
6   'level' varchar(3) DEFAULT NULL,  
7   'user' varchar(15) DEFAULT NULL  
8   UNIQUE KEY 'sensor_id' ('sensor_id')  
9 );
```

Cada entrada possui um identificador único e irrepetível (*sensor_id*), que corresponde ao endereço MAC do sensor respetivo e se encontra associado a um utilizador do sistema, especificado no campo *user*. Por sua vez, os campos *latitude* e *longitude* albergam as coordenadas em que cada sensor é fixado. O sistema deverá ainda permitir ao utilizador, se tal for aplicável, aferir o piso em que se encontra, pelo que essa informação, retirada a partir da localização do sensor mais próximo, é disponibilizada a partir do campo *level*. Por último, o campo *storage_date* armazena uma marca temporal que indica a data (na forma *yyyy-mm-dd*) e a hora da última alteração efetuada à localização do sensor.

3.5 Interfaces com o Utilizador

3.5.1 *TLSApp* - Aplicação *Android*

A imprescindibilidade de maximizar a funcionalidade do sistema de localização idealizado para que este pudesse funcionar como módulo central de todo o sistema resultou no desenvolvimento de uma aplicação *Android*, passível de ser utilizada por equipamentos com o mesmo sistema operativo, atualmente disseminados no mercado. A *TLSApp*, nome dado à aplicação, recorre a uma ligação *Bluetooth* de baixa energia para obter a localização dos pontos de referência mais próximos, onde se encontram instalados os sensores, e a dados do *Google Maps* para exibir a posição do dispositivo. O *Google Maps* é uma biblioteca externa que contém mapas à escala global, com elevada aproximação e uma poderosa quantidade de informações sobre cidades, ruas e atividades comerciais, com maior incidência nos países desenvolvidos. Atualmente já possibilita a visualização de mapas detalhados do interior de diversos edifícios e foi lançado em Portugal no último mês de janeiro, com um total de 49 edifícios mapeados [55], sendo esta uma modalidade que a empresa pretende continuar a expandir. Com a integração deste serviço, conhecendo-se a posição do dispositivo na forma de coordenadas geográficas é possível providenciar ao cliente uma boa perspetiva da sua localização global e local. A utilização do pacote de mapas da *Google* requer, ainda assim,

a disponibilidade prévia de uma ligação de dados (rede *Wi-Fi* ou outras), caso os mapas não tenham sido carregados anteriormente.

A aplicação começa por verificar a compatibilidade do dispositivo com os requisitos impostos para a sua execução (*Bluetooth Low Energy* e a biblioteca *Google Play Services*, onde está incluída a API *Google Maps*). Caso um dos requisitos não seja cumprido, a aplicação exibe uma mensagem de erro e termina a sua execução. Se porventura o dispositivo estiver equipado com *Bluetooth LE* e este não se encontrar ativo, a aplicação tenta que este seja ativado pelo utilizador através do aparecimento de uma mensagem. Ultrapassada a verificação de compatibilidade, a aplicação exibe em pano de fundo um mapa do *Google Maps* com zoom planetário, enquanto é lançado o serviço que constitui o corpo da aplicação. Este serviço corre em dois processos distintos, que se interligam: por um lado, o serviço procede à pesquisa pelos dispositivos *SensorTag*, lançando sucessivos *LE scans* durante um intervalo de tempo que é, por defeito, de 7 segundos. Cada um destes *scans* tem uma duração de 350 *ms* – tempo suficiente para que os *SensorTag* se façam anunciar nos recetores, pelo menos por uma vez – intercalados por uma pausa com o mesmo período, e devolvem o identificador dos sensores encontrados e a potência do sinal recebido pelo dispositivo (RSSI). Estes valores são armazenados num *array* e no final dos sete segundos, a potência recebida, proveniente de cada um dos sensores encontrados, é calculada em função da ponderação entre as 10 amostras armazenadas e as 10 amostras recolhidas na iteração anterior, as quais se encontram armazenadas noutra estrutura de memória e serão substituídas após o cálculo da posição pelos valores mais recentes.

Caso sejam detetados pelo menos três sensores nas proximidades, o segundo processo ordena os dispositivos por ordem decrescente do RSSI, seleciona os primeiros três, convertendo a grandeza medida para a distância que separa o dispositivo do respetivo sensor, e de seguida liga-se à base de dados remota para receber informações relativas aos mesmos (as suas coordenadas geográficas e o piso em que se encontram se aplicável), num processo detalhado proximamente na subsecção 3.6. Realizar o cálculo da posição do dispositivo partindo de dados na forma de coordenadas globais traria uma complexidade acrescida ao algoritmo, pelo que se optou por converter as coordenadas obtidas para coordenadas cartesianas (em metros), ficando o dispositivo em condições de calcular a sua posição através do algoritmo enunciado na subsecção 3.3. A posição calculada é depois reconvertida para coordenadas geográficas e, com o auxílio de um *LocationListener*, exibida no mapa, aquando da sua atualização, através de um marcador circular de cor azul, sendo que o mapa se aproxima e se ajusta automaticamente ao posicionamento do dispositivo. O segundo processo entra então em pausa, à espera que uma nova pesquisa termine, e ambos reiniciam em seguida. Caso o número de sensores detetados na proximidade do dispositivo seja menor que três, e não seja possível efetuar o cálculo da posição, a aplicação exibe a última posição calculada (caso esta exista); por defeito, se após 40 segundos não tiver sido possível realizar qualquer atualização é apresentada uma mensagem e o serviço é terminado, de forma a otimizar o desempenho do dispositivo.

No cenário apresentado, por cada nova iteração do ciclo que procede à atualização da posição, seria necessário efetuar sempre três pedidos – um por cada sensor – ao servidor externo sobre o qual a base de dados se encontra funcional, mesmo que o utilizador se

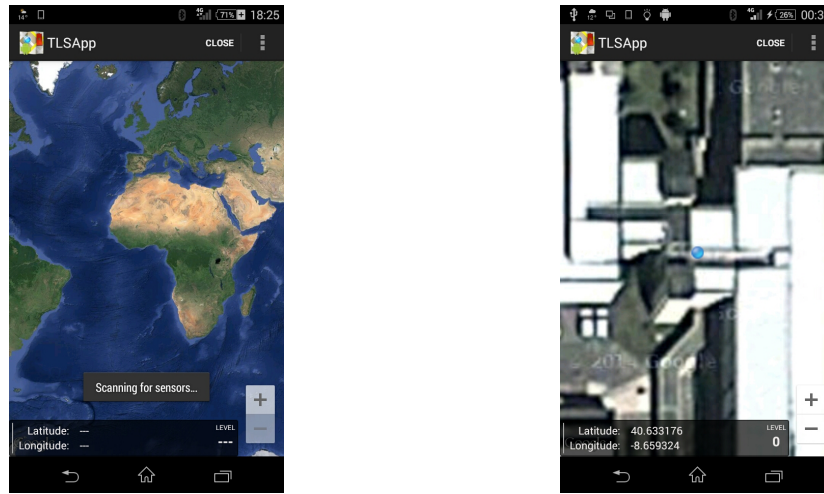


Figura 3.4: Mapa inicial da *TLSApp* e posição do dispositivo em imagens de satélite.

mantivesse por largos períodos de tempo no alcance dos mesmos três sensores. Além de poder implicar um gasto de tempo desnecessário, esta circunstância poderia levar à sobrecarga do servidor caso o número de utilizadores da aplicação (e por consequência o número de pedidos simultâneos de leitura) fosse elevado. Para prevenir este tipo de ocorrência, reservou-se na memória utilizada pela *TLSApp* uma lista que deve armazenar as coordenadas de todos os sensores conhecidos. Desta forma, a base de dados será acedida apenas quando as coordenadas do sensor não se encontrem na lista. No caso hipotético de um utilizador entrar numa área coberta apenas por três sensores, a base de dados será acedida, enquanto este aí se mantiver, apenas por três vezes aquando da primeira estimativa da posição, o que implica inevitavelmente uma redução substancial do número de pedidos efetuados em paralelo.

Uma representação esquemática do funcionamento da aplicação está ilustrada na figura 3.5. Acresce ainda referir que se em qualquer momento da execução da aplicação for pulsada, no menu, a opção *Close*, esta é encerrada (colocada em *background*), interrompendo a execução do serviço e dos seus processos e libertando a região de memória ocupada pelo seu funcionamento, onde se inclui a lista de sensores anteriormente referida.

Idealmente, o serviço que comanda a aplicação deveria manter o seu funcionamento de uma forma constante e ininterrupta, apenas com a imposição dos tempos de atraso definidos anteriormente. No entanto, o uso da aplicação por largos períodos de tempo requer um significativo esforço de computação e de utilização da memória RAM que pode não ser do agrado do utilizador, ou por não ser necessário ou devido às limitações impostas pelo próprio dispositivo. Prevendo esta possibilidade, a *TLSApp* dá liberdade ao utilizador, através de um menu de definições, para escolher o período entre atualizações numa gama variável entre os 6 e os 15 segundos. Por consequência, o tempo que o serviço levará a parar caso não seja possível realizar novas atualizações variará, consoante o período escolhido, entre os 45 e os 75 segundos de tal maneira que cada aumento de 3 s no tempo entre atualizações pressuponha um aumento de 10 s no tempo de paragem. O aumento

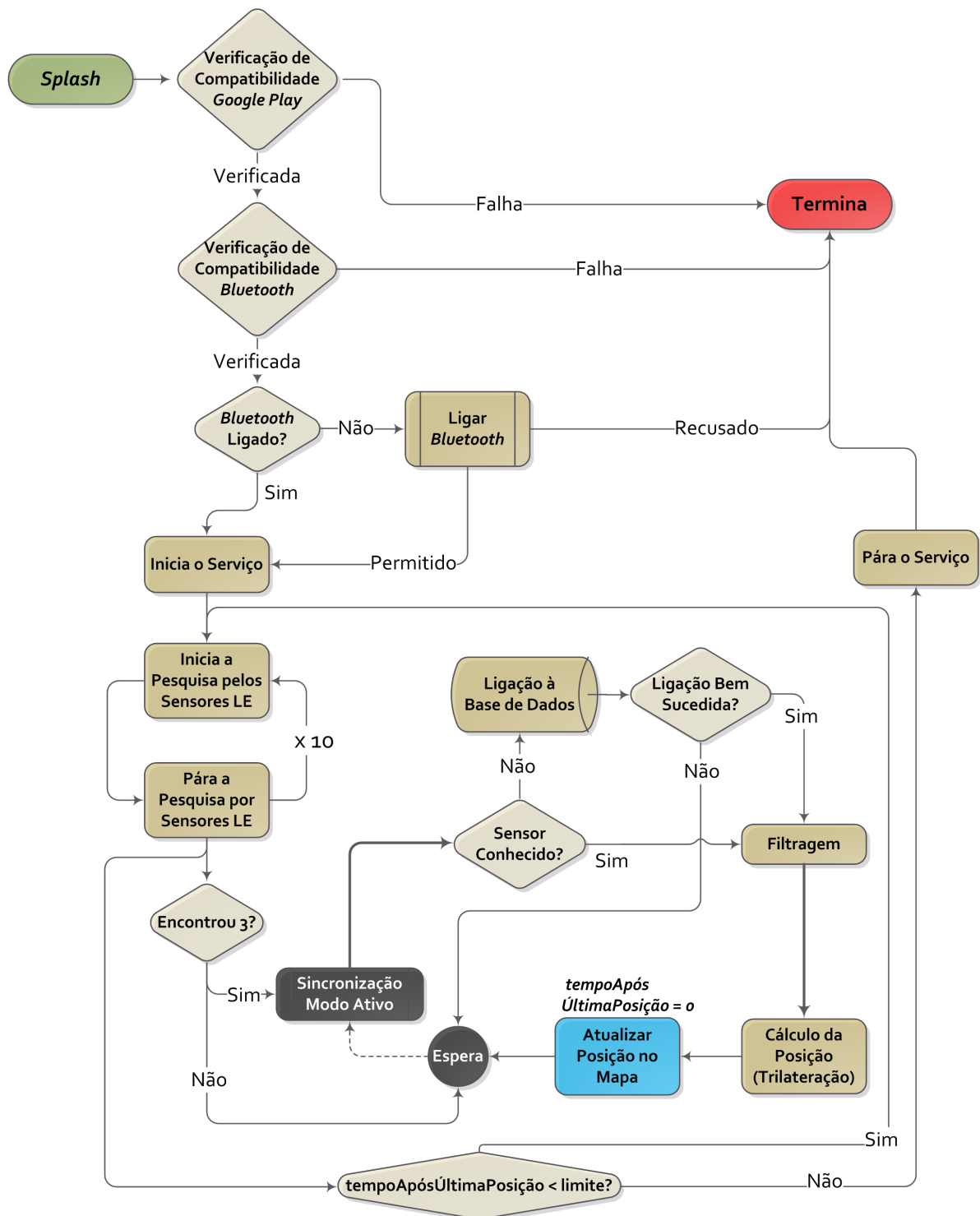


Figura 3.5: Fluxograma explicativo do funcionamento da *TLSApp*.

do tempo de pesquisa leva a que o número de amostras retiradas para determinar uma medição também aumente, não devendo ainda assim traduzir-se num aumento substancial da fiabilidade da mesma, como se prova mais adiante neste trabalho. Se, mesmo assim, for do interesse do utilizador que a aplicação não se interrompa quando não for possível calcular a posição do dispositivo, bastará para isso desativar a caixa de seleção existente para o efeito.

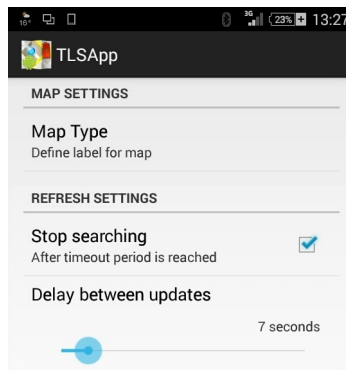


Figura 3.6: Menu de definições da *TLSApp*.

O menu de configuração fica completo, visto a adaptação ao posto de vista do cliente ser um aspeto importante, com a possibilidade proporcionada pelo *Google Maps* de alternar a vista da aplicação entre três opções: mapa (predefinido), imagens de satélite e um modo híbrido. Estas definições são preservadas de forma persistente através do mecanismo *SharedPreferences* do *Android*, permitindo que as preferências do utilizador sejam aplicadas quando a aplicação for novamente executada.

3.5.2 *System Management* - Aplicação Web

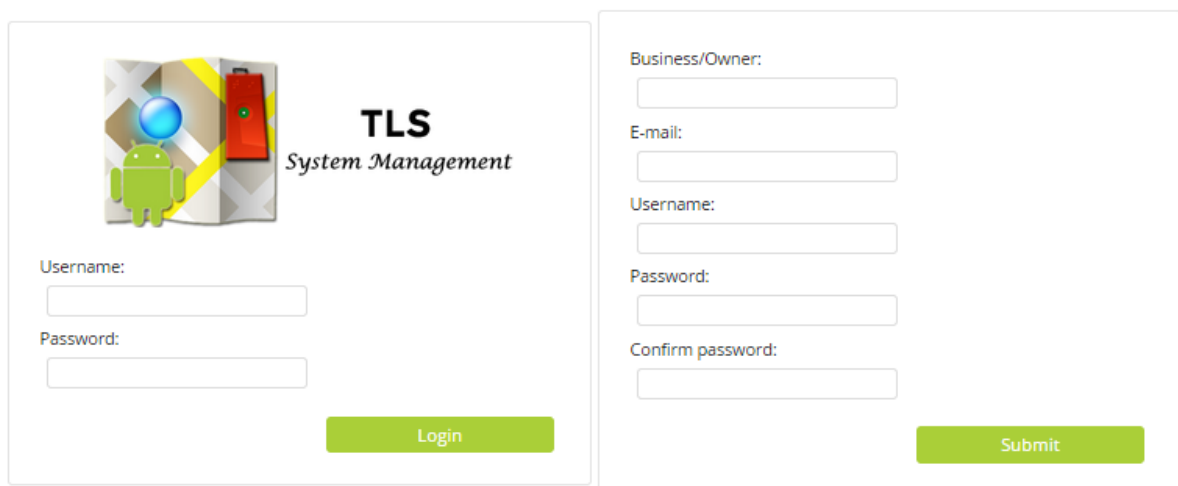
No sistema idealizado, o estabelecimento de sensores em posições conhecidas implica que a sua fixação tenha que ser realizada previamente, e as suas coordenadas inseridas na base de dados alojada no servidor. Se porventura a disposição dos sensores num determinado espaço necessitasse de ser alterada, ou existisse a necessidade de acrescentar ou retirar um sensor do conjunto, esta tarefa implicaria sempre que o administrador do sistema entrasse na base de dados e fizesse as respetivas alterações, mesmo nos casos pontuais em que o gestor do espaço tivesse capacidade para o fazer. Neste contexto foi criada uma página *web* com o intuito de simplificar este processo para administrador e clientes, assente na linguagem de marcação HTML (do ponto de vista do cliente) e na linguagem de programação PHP (do ponto de vista funcional e da ligação ao servidor), em virtude da existência de pontos de contacto entre as duas linguagens que facilitam o processamento da informação.

O acesso à página principal, onde está localizado o painel de controlo, é limitado por um sistema de *login* com nome de utilizador e *password*. A implementação deste sistema

3. Descrição do Sistema

requereu a criação de uma nova tabela na base de dados para armazenar esta informação, cuja estrutura se segue.

```
1 CREATE TABLE IF NOT EXISTS 'login' (  
2   'id' int unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,  
3   'username' varchar(15) DEFAULT NULL,  
4   'password' varchar(35) DEFAULT NULL,  
5   'name' varchar(50) DEFAULT NULL,  
6   'email' varchar(30) DEFAULT NULL,  
7   'status' int unsigned DEFAULT NULL,  
8   UNIQUE KEY 'id' ('id')  
9 );
```



The image shows two web forms side-by-side. The left form is for login, titled "TLS System Management", and contains fields for "Username:" and "Password:" with a green "Login" button. The right form is for registration, containing fields for "Business/Owner:", "E-mail:", "Username:", "Password:", and "Confirm password:", with a green "Submit" button.

Figura 3.7: Menus de *login* e registo na página *web*.

Cada espaço onde o sistema será implementado terá uma conta a si associada com indicações sobre o proprietário (*name*) e um contacto *e-mail*, na eventualidade de ocorrerem questões sensíveis relativamente ao sistema instalado. Após o utilizador efetuar o registo, este é inscrito numa nova entrada desta tabela, que inclui todos os pares *username-password* cifrados, por questões de segurança, segundo o algoritmo MD5. Para que o registo seja submetido é necessário que todos os campos sejam preenchidos, que o nome de utilizador inserido não exista ainda na base de dados e que a *password* inserida, por duas vezes de forma a evitar erros por parte do utilizador, seja a mesma nos dois campos. O utilizador não ganha imediatamente a capacidade de aceder ao painel de controlo da aplicação *web*, de maneira a evitar a intrusão de entidades exteriores à implementação do sistema – tal só acontecerá quando um administrador, após verificar a identidade do detentor da conta, aceitar a submissão ativando a *flag* de *status* existente na base de dados.

O painel de controlo é constituído por uma tabela onde estão listados os endereços MAC (*Identificadores*) de todos os sensores associados à conta (e por consequência inseridos no espaço), seguidos das coordenadas globais (*Latitude* e *Longitude*) em que se encontram fixados. Nas colunas seguintes exibem-se o piso e a data da última alteração registada. As duas últimas colunas contêm dois ícones: o primeiro (*Editar*) permite alterar a localização do sensor e o segundo (*Apagar*) remove-o da base de dados. À esquerda existe um menu com duas opções adicionais:

- A primeira (*Adicionar Relação*) abre uma caixa de inserção que permite adicionar um sensor à base de dados. Note-se que esta opção apenas permite uma relação nova e não atualizar uma existente, tal deve ser realizado com maior simplicidade através do botão *Editar*;
- A segunda (*Mapa*) exibe a localização dos sensores associados à conta num mapa do *Google Maps* que se ajusta automaticamente para permitir a visualização de todos os sensores como vista predefinida.

Apesar de na generalidade do sistema as coordenadas globais serem tratadas na forma decimal (requerida pela aplicação *Android* e pelo *Google Maps*), a inserção e apresentação das coordenadas dos sensores na aplicação *web* é realizada com a formatação horária (*dd° mm' ss''*) por ser tida como mais *user-friendly* e por refletir de forma mais evidente pequenas variações no posicionamento. Como o resto do sistema (incluindo a base de dados onde se alojam as coordenadas inseridas) se rege pela formatação decimal, as coordenadas inseridas são imediatamente convertidas após a submissão e reconvertidas para o formato horário ao ser exibidas na página.

User: a [Logout](#)

You have been sucessfully logged in.



TLS
System Management

Add New Entry

Network Map

Sensor	Latitude	Longitude	Level	Placement Date	Edit	Delete
2A:C3:34:F2:54	40° 38' 0.18"	-8° 39' 34.11"	0	2014-10-16 15:16:14		
3E:2C:53:80:03	40° 37' 59.36"	-8° 39' 33.27"	0	2014-07-23 16:47:35		
7B:00:35:1B:3A	40° 37' 59.63"	-8° 39' 33.39"	0	2014-09-08 09:18:30		
90:53:86:AF:0A	40° 37' 59.45"	-8° 39' 34.12"	0	2014-10-16 14:59:04		
90:53:86:AF:0B	40° 37' 59.59"	-8° 39' 33.80"	0	2014-10-16 15:03:39		
CA:34:5E:2F:21	40° 38' 0.65"	-8° 39' 34.38"	0	2015-03-18 11:20:33		

Figura 3.8: Painel de controlo da aplicação *web*.

A inserção e edição de entradas na base de dados possui ainda um mecanismo de controlo que impede a introdução de coordenadas fora da escala admissível (latitude entre -90° e 90°, longitude entre -180° e 180° e um número de minutos e segundos que tem que ser zero ou positivo menor que 60). Para uma melhor monitorização dos dados, ao ser adicionada

Forma de edição de dados de um sensor na aplicação web. O formulário contém campos para:

- Sensor ID: 34:B1:F7:D4:FC:CE
- Latitude: ° ' . "
- Longitude: ° ' . "
- Level:

Um botão verde "Edit" está localizado no canto inferior direito do formulário.

Figura 3.9: Menu de edição da aplicação *web*.



Figura 3.10: Mapa com a disposição dos sensores.

ou editada uma entrada da base de dados principal, a data de fixação é automaticamente atualizada para a data atual.

Como nota final, é essencial referir que apesar de todas as restrições o sistema não é imune a erros na inserção dos dados dos sensores, e a sua ocorrência pode levar à distorção das estimativas determinadas pela *TLSApp*. Nesse sentido, numa hipotética aplicação comercial seria recomendável que a realização desta tarefa ficasse a cargo do administrador do sistema ou de um gestor localizado do espaço, requerendo-se em qualquer das formas alguma atenção durante o procedimento.

3.5.3 Tratamento das Coordenadas

A implementação deste sistema implica a utilização de diferentes tipos de coordenadas, consoante as situações em que são aplicadas. Para exibir a posição do dispositivo e dos sensores nos *Google Maps* das duas aplicações é necessário utilizar coordenadas globais na forma decimal (*dd.ddddddd*), mas no Painel de Controlo da página *web* a disposição das coordenadas globais é feita na forma horária, em minutos e segundos (*dd° mm' ss"*), como explicado na subsecção anterior. Por outro lado, por uma questão de simplicidade, a trilateração no cálculo da posição do dispositivo utiliza coordenadas cartesianas. Para que seja possível a integração de todos os dados no sistema é necessário realizar a conversão entre as diversas grandezas, como se segue.

Coordenadas Geográficas: Formatos Horário e Decimal

Dada uma coordenada geográfica na forma $d^{\circ} m' s''$, calcula-se a mesma coordenada na forma decimal como sendo:

$$dd = d + \frac{m}{60} + \frac{s}{3600} \quad (3.12)$$

Em sentido contrário, para encontrar o grau de uma coordenada basta retirar o valor inteiro da coordenada em formato digital e para encontrar o número de minutos multiplica-

se por 60 o remanescente dos dois valores. Como existe ainda um fator secundário a calcular, o número de minutos tem que ser inteiro:

$$d = (int) \, dd \quad (3.13)$$

$$m = (int) \, ((dd - d) \times 60) \quad (3.14)$$

Para obter a coordenada em segundos basta encontrar o remanescente do número de minutos e multiplicá-lo por 60 ou, em alternativa, o remanescente do grau multiplicado por 3600:

$$s = \left(dd - d - \frac{m}{60} \right) \times 3600 \quad (3.15)$$

Note-se que esta conversão não tem em conta o quadrante da coordenada que se converte (Norte, Sul ou Este, Oeste). Isto é, ao assumir-se um eixo único de coordenadas para a latitude e para a longitude, em que os pontos localizados no hemisfério Sul ou no hemisfério Ocidental possuem ponderação negativa, as conversões anteriores têm sempre em conta o módulo da coordenada.

Coordenadas Geográficas e Coordenadas Cartesianas

A conversão de coordenadas geográficas para coordenadas cartesianas implica sempre o estabelecimento de uma referência. Como é sabido, no sistema de coordenadas geográficas a latitude é determinada relativamente ao eixo polar da Terra e a longitude em relação ao eixo de rotação. Desta forma, pode considerar-se como equivalente à origem, ponto de coordenadas zero utilizado no sistema cartesiano, o ponto de interseção entre o Equador (latitude zero) e o semimeridiano de Greenwich (longitude zero), localizado no centro do planisfério.

Utilizaram-se para a conversão as fórmulas enunciadas em [56], que convertem as coordenadas globais no número de metros em relação a este ponto com um erro inferior a 0.2%. Para distâncias bastante elevadas, como é o caso do continente europeu, a aplicação desta fórmula sem correção ou retrocesso suporia uma perda de precisão muito considerável (da ordem das centenas de quilómetros), mas como o que nos importa é apenas a distância relativa entre os três sensores, sendo a reconversão efetuada de seguida pelo mesmo método, esta imprecisão não se verifica.

$$1_{latitude}^{\circ} = 111132.92 - 559.82 \cos(2 \, lat) + 1.175 \cos(4 \, lat) \quad (3.16)$$

$$1_{longitude}^{\circ} = 11141284 \cos(lng) - 93.5 \cos(3 \, lng) \quad (3.17)$$

As fórmulas para a latitude e para a longitude derivam do cálculo do comprimento de arcos meridianos, da distância aos meridianos centrais (Equador e semimeridiano de Greenwich) e do raio de curvatura da Terra [57] e são por isso similares, ainda que diverjam pela orientação perpendicular e pelo facto de a longitude possuir uma gama mais ampla que a latitude (360° contra 180°) devido ao carácter ligeiramente elipsoidal do nosso planeta.

A distância l entre dois pontos a diferentes latitudes pode ser calculada como se segue, sendo o cálculo para a longitude análogo:

$$l = \Delta lat \times 1_{latitude}^{\circ} \quad (3.18)$$

É importante enfatizar que estas fórmulas só permitem calcular a distância entre dois pontos que se encontrem em torno da mesma latitude ou da mesma longitude, o que é mais que suficiente para sistemas com aplicação localizada como o TLS, visto as distâncias entre diferentes pontos não ultrapassarem sequer a centena de metros. No entanto, caso se pretenda realizar o cálculo entre dois pontos em diferentes partes do globo a complexidade do processo aumenta, dado os comprimentos de um grau de latitude e de longitude serem variáveis.

3.6 Protocolo de Comunicação

Tratando-se o sistema proposto de um agregado de diferentes módulos interligados, a existência de um protocolo que sirva como referência para a troca de informação entre ambos torna-se necessária para assegurar o seu correto funcionamento.

A transferência de informação da base de dados para a aplicação *Web* realiza-se no âmbito do servidor remoto, visto ser aí que ambas se encontram alojadas. Sempre que se justifique o acesso à base de dados, a aplicação *Web* executa a função *mysql_query()*, presente na biblioteca de funções da linguagem PHP, cujo argumento (uma *string*) representa um conjunto de comandos na linguagem SQL (*Structured Query Language*) que são atendidos pelo servidor e processados diretamente pela base de dados. No caso da transferência de dados em que a *database* fornece à *TLSApp* as coordenadas de cada sensor esta transferência não é tão trivial, visto carecer de uma conexão suplementar entre a aplicação *Android* e o servidor da base de dados. É neste ponto que o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), um protocolo de aplicação para sistemas de informação distribuídos baseados em *hypermedia* e um meio de informação não-linear vastamente utilizado do qual é exemplo clássico a *World Wide Web*, assume uma importância preponderante.

O modo de funcionamento de uma ligação segundo o protocolo HTTP obedece à relação servidor-cliente, em que o segundo envia um pedido ao primeiro (*request*), seguido de outras mensagens do tipo MIME (*Multipurpose Internet Mail Extension*) que contêm informações sobre o cliente e as características da ligação entre ambos. O servidor responde com uma mensagem *HTTP Response* aceitando ou recusando o pedido, seguida similarmente de outra mensagem do tipo MIME que contêm informação sobre as tarefas do servidor. As requisições efetuadas são orientadas ao ficheiro, ou seja, em caso de a informação requisitada estar localizada em diversos ficheiros (como na generalidade das páginas *Web*) o cliente é obrigado a realizar múltiplos *requests*, e a comunicação é do tipo *stateless* – o servidor responde aos pedidos dos clientes independentemente do número e do grau de sucesso de interações anteriores.

O estabelecimento da comunicação entre a *TLSApp* e o servidor remoto é realizado sob a forma do envio de mensagens *HTTP Request* e *HTTP Response*, sendo por isso pertinente

explicar a constituição deste tipo de mensagens.

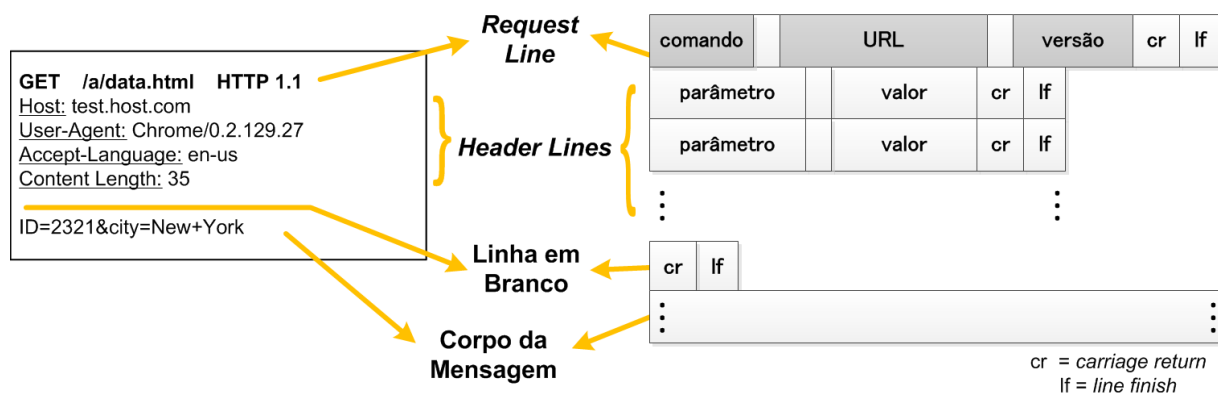


Figura 3.11: Exemplo e formato de uma mensagem *HTTP Request*.

Apesar de as mensagens *HTTP Request* poderem referenciar diversos tipos de ações consoante a função pretendida (*get* ou *post* para aceder a um recurso, *post* ou *put* para o criar ou modificar, *delete* para eliminar, etc.), o seu cabeçalho segue um formato análogo, esquematizado na figura 3.11. A primeira linha (*request line*) contém o tipo de mensagem (comando) seguida do URL do recurso a aceder e a versão do protocolo HTTP. O cabeçalho fica completo com as linhas seguintes (*header lines*), agrupadas por parâmetro e valor(es), que estão destinadas à descrição das características da ligação (segurança, encapsulamento, etc.), e com uma linha em branco que antecede o corpo da mensagem, onde se explicitam os detalhes do pedido a ser aplicados no URL de destino.

No sistema dimensionado, a *TLSApp* efetua uma *HTTP Request* do tipo *post* para obter as coordenadas e o piso em que se encontra um sensor, caso não tenha disponível qualquer informação sobre o mesmo. No cabeçalho da mensagem é colocado o endereço do servidor remoto e no corpo de cada mensagem é enviado o *MAC address* do sensor juntamente com uma chave identificadora, *id*.

POST		index.php		HTTP/1.1	cr	lf
host		http://sensorshost.host56.com			cr	lf
id		sensor_id				

Figura 3.12: Estrutura da mensagem *HTTP Request* enviada pela *TLSApp*.

```
HttpClient httpClient = new DefaultHttpClient();
HttpPost httpPost = new HttpPost("http://sensorshost.host56.com/index.php");
List<NameValuePair> nameValuePair = new ArrayList<NameValuePair>(1);
nameValuePair.add(new BasicNameValuePair("id", sensorid));
httpPost.setEntity(new UrlEncodedFormEntity(nameValuePair));
HttpResponse response = httpClient.execute(httpPost);
```

Do lado do servidor, o pedido é atendido por um ficheiro do tipo PHP, adicionado previamente ao sistema de ficheiros do servidor e que possui as informações necessárias para o estabelecimento da ligação (como o nome de utilizador e a *password* da conta administrativa e o nome da base de dados). Este ficheiro executa novamente na linguagem SQL a conexão com a base de dados, selecionando através do comando *mysql_query()* a informação a resgatar e, caso nenhum erro seja detetado, retorna a *request* com uma *HTTP Response* que inclui os dados pretendidos.

HTTP Response Header		Latitude 40.24356	Longitude -8.17645	P
-----------------------------	--	-----------------------------	------------------------------	----------

Figura 3.13: Formato da mensagem de resposta do servidor.

Esta segunda transação é codificada, no campo da programação de alto nível, através do formato JSON [58], abreviatura para *Javascript Object Notation*, um padrão de baixa complexidade concebido para a troca e estabelecimento de dados que é uma das opções mais simples para implementar o envio de mensagens pelo protocolo HTTP, sendo utilizado de forma recorrente como alternativa à linguagem XML pela maior simplicidade e igual adaptabilidade.

Apesar de utilizar a sintaxe *Javascript*, o JSON é um padrão de texto que pode ser utilizado por qualquer outra linguagem de programação. É constituído por duas estruturas de dados universais, um conjunto de pares *string*-valor (objeto) e uma lista de valores (vetor). A sintaxe utilizada para instanciar objetos e vetores é do tipo:

$$\{ (nome\ do\ objeto) : (valor), \} \implies Objeto$$

$$[(valor\ 1), (valor\ 2), \dots] \implies Vetor$$

No caso, a mensagem recebida pela *TLSApp* será constituída por um *array*, que armazena a informação requisitada, e por mais um campo que serve como indicador do sucesso da operação. Desta forma, o conteúdo em JSON de uma mensagem bem-sucedida será, por exemplo:

`{"array" : [{"latitude" : "40.24356", "longitude" : "- 8.17645", "level" : "0"}]}`.

Capítulo 4

Tratamento dos Dados

Com a estrutura do sistema definida e operacional tal como detalhada no capítulo 3, o passo seguinte no desenvolvimento deste projeto incidiu na análise e processamento dos dados da potência transmitida pelos dispositivos *SensorTag* e recebida pela *TLSApp*, no sentido de tentar perceber qual a melhor forma de os utilizar para efetuar o posicionamento. Verificou-se que os dados recebidos não puderam de forma imediata ser alvo de compreensão e análise, obrigando a um estudo detalhado das características de propagação e à aplicação de métodos de tratamento do sinal recebido. Diversas interrogações, às quais se deveram diversos fatores, foram colocadas durante esta fase do trabalho. Neste capítulo faz-se, de forma sequencial, uma descrição dos problemas encontrados e das abordagens seguidas para os solucionar, nos casos em que tal tenha sido possível.

4.1 Caracterização do Sinal e Modos de Medição

Segundo o *datasheet* do módulo *CC2541*, o sinal de presença dos *SensorTag* é, por defeito, emitido com uma potência de 0 *dBm*. Porém, o sinal é enviado num intervalo de tempo discriminado no *Manual do Utilizador* como igual a 100 *ms* e o período do sinal não é especificado, ainda que se suponha que seja de uma ordem de grandeza inferior. Se, por exemplo, durante 10 *ms* for realizada uma transmissão a 0 *dBm* e nos restantes 90 existir um vazio, a média da potência transmitida será de -10 *dBm*. Ou seja, o RSSI que é medido pelos dispositivos recetores é certamente inferior à potência máxima e irá também depender da qualidade de receção dos mesmos dispositivos, o que pode implicar níveis de potência bastante baixos e próximos dos níveis de ruído existentes no meio, não sendo, por isso, de descartar que o sinal transmitido se possa diluir no ruído caso este seja anormalmente elevado.

Como ponto prévio para a implementação de todo o sistema, e assentando este numa rede de sensores sem fios, era então necessário olhar às condições com que os dados eram emitidos e, por conseguinte, chegavam ao dispositivo que os recebia. Neste ponto existiam duas abordagens possíveis para levar a cabo esta análise: uma (1) foi a utilizada na *TLSApp*, em que um dispositivo (por exemplo um *smartphone*) procura pelos sinais que

os *SensorTag* estão a difundir, tomando nota da potência com que os recebe. A outra (2) é praticamente a inversa: o mesmo dispositivo procura pelos sinais dos *SensorTag*; ao encontrá-los, efetua o emparelhamento com os mesmos mediante o servidor GATT e, após a ligação estar estabelecida, lê a potência que o *SensorTag* está a receber do próprio dispositivo, enviando um pedido de leitura com a chave correspondente.

Numa aplicação como a *TLSApp*, em que o período entre medições consecutivas é já considerável (da ordem das décimas de segundo), a abordagem (1) é claramente a indicada, não apenas pela simplicidade – numa rede com dezenas de sensores, o processo de realizar o emparelhamento com todos eles múltiplas vezes e em intervalos de tempo reduzidos, aliado aos pedidos de leitura e à espera pelas respostas, seria não só muito mais demorado como verdadeiramente dispendioso ao nível dos gastos energéticos e do consumo da bateria. Todavia, ainda que a abordagem (2) pareça de uma maior e desnecessária complexidade, no capítulo da caracterização do sinal apresenta uma vantagem significativa: como o *SensorTag* emite o sinal de presença com um intervalo de 100 *ms*, o emparelhamento com um dispositivo mais rápido permite um maior débito de dados e, por isso, uma análise mais completa ao sinal recebido.

Posto isto, como alternativa para mais eficientemente caracterizar o sinal, a abordagem (2) foi a escolhida. Note-se que, neste caso, a análise realizada ao RSSI corresponde ao sinal difundido no sentido contrário (a partir do *SensorTag*), e desta forma os níveis de potência medidos são diferentes, já que a trama transmitida entre os dois dispositivos também é diferente. Mas como o sinal circula no mesmo meio, possuindo o mesmo comportamento com a distância, e como as antenas recetoras dos dispositivos *Android* também terão especificações forçosamente diferentes (dada a enorme diversidade de equipamentos existente no mercado), qualquer caracterização do sinal e tentativa de acondicionamento que seja experimentada revelar-se-á mais eficaz nuns dispositivos do que noutros. Por isso, a utilização de duas abordagens distintas, uma para a implementação funcional (1) e outra para a caracterização e acondicionamento do sinal (2), pode ser admitida sem perda de rigor adicional.

Banda de frequências ISM 2.4 - 2.4835 <i>GHz</i>
Taxas de transmissão até 3 <i>Mbps</i> , 250 <i>Kbps</i> em modo LE
Sensibilidade de -82 <i>dBm</i> para uma BER inferior a 0.1%
Alcance até 110 <i>m</i> em espaço aberto
Baixa dissipação de potência (máximo: 8 <i>dBm</i>)
Dimensão reduzida: $19.47 \times 16 \times 8.1$ <i>mm</i>

Tabela 4.1: Características técnicas do adaptador *LM506*.

Por uma questão de facilidade na obtenção e tratamento dos dados, a alternativa escolhida recaiu no emparelhamento dos *SensorTag* com um computador equipado com os sistemas operativos *Windows* e *Linux*. Para tal utilizou-se o adaptador *Bluetooth LM506*

[59], um adaptador USB Classe 1 desenvolvido pela *LM Technologies* cuja caracterização é feita na tabela 4.1, e que permitiu recolher amostras da potência de sinal recebido pelo *SensorTag* com um período medido experimentalmente de apenas 10 ms.

Um primeiro emparelhamento entre os dispositivos permitiu imediatamente perceber a complexidade do trabalho a desenvolver. A leitura dos sucessivos valores de RSSI recebidos pelo dispositivo era fortemente inconstante, mesmo quando os sensores e o adaptador se encontravam praticamente lado a lado. Como se não bastasse, ao afastar gradualmente o sensor do adaptador, o ruído deteriorou ainda mais o sinal recebido. Verificou-se experimentalmente que o *SensorTag* conseguia receber uma potência máxima de -59 dBm , podendo no mínimo atingir os -101 dBm a vários metros de distância, mas este era um valor consideravelmente abaixo da sua sensibilidade (-88 dBm). Mesmo que o adaptador pudesse ter uma captação pior que a especificada no *datasheet*, os dados estavam corrom-

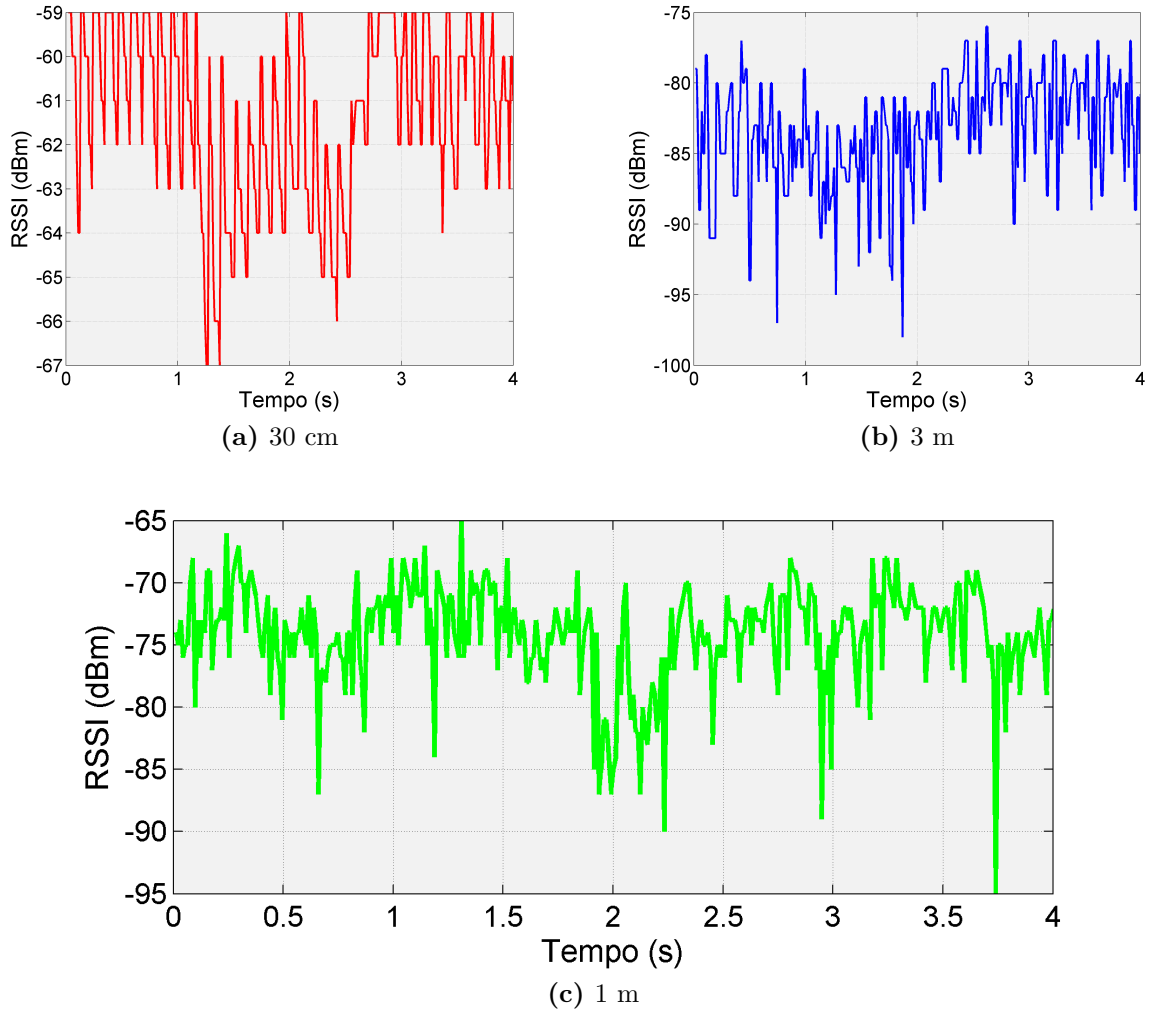


Figura 4.1: Variação da potência do sinal recebido, sem filtragem, pelo adaptador.

pidos com uma quantidade significativa de ruído. Como é sabido, o aumento da distância entre o dispositivo e um sensor leva a uma diminuição dos níveis de potência recebidos e ao aumento da interferência multipercurso. No caso, a atenuação do sinal no percurso em que era propagado levava a que à partida, como fica patente nos gráficos seguintes, não só não existisse qualquer constância nas medições como os valores obtidos ao longo do tempo preenchiam praticamente toda a gama admissível para o tratamento da potência do sinal transmitido, o que não permitia a obtenção de medidas fiáveis sem que se levasse a cabo um eficaz processo de filtragem dos dados.

4.2 Filtragem

A magnitude do ruído existente num determinado ambiente é variável para todos os pontos da área em que o sistema possa ser implantado. Numa conjuntura ideal, tal implicaria a aplicação de filtros localizados, infinitesimais, com diferentes características e/ou parâmetros, mas isso é algo que não é exequível na prática. Assim sendo, o algoritmo de filtragem a dimensionar não conseguiria eliminar completamente a instabilidade associada à medição, pelo que, numa abordagem mais sensata, se traçou como objetivo manter para níveis de potência superiores à sensibilidade do recetor uma variabilidade inferior a 5 *dBm*. Mesmo supondo especificações mais favoráveis de outros recetores, um desfasamento desta grandeza pode converter-se numa distância não-negligenciável devido à reduzida gama admissível para a potência, pelo que o preço a pagar se reflete na necessidade de preencher as áreas cobertas pelo sistema com uma maior densidade de sensores, de tal forma que seja possível minimizar a relevância de eventuais regiões do espaço onde o RSSI de um dos sensores mais próximos apresente valores mais reduzidos.

A primeira e mais rudimentar abordagem consistiu na implementação de um método que efetuava a média de uma quantidade n de medidas consecutivas. Apesar de ter como principal vantagem uma fácil implementação, este método conduz a um aumento do tempo de processamento do algoritmo proporcional ao número de medidas utilizado. Coincidentemente, só para um valor muito elevado de n se obtiveram resultados deveras satisfatórios. $n = 100$ foi o número de amostras suficiente para produzir um efeito significativo, mas conduziu a novo problema: a impraticabilidade da sua aplicação quando os dados são debitados de forma periódica e lenta, ao invés da torrente de amostras simulada. O adaptador *LM506* é capaz de efetivar taxas de receção de dados até 250 *Kbps* em modo LE e, dessa forma, uma alteração do RSSI é refletida no recetor após pouco mais de 10 *ms*, o que permitiria calcular uma nova amostra por segundo, mas na *TLSApp*, que recolhe dados com períodos na ordem da décima de segundo, o processo tornar-se-ia incompreensivelmente moroso.

Havia então, que tentar uma nova possibilidade. Voltando ao gráfico da figura 4.1a, que corresponde à situação em que o *SensorTag* e o adaptador se encontram mais próximos, é possível observar que, por entre diversas flutuações, existe um comportamento periódico nos valores do RSSI que se verifica, ainda que de forma irregular, a cada 7 a 10 amostras. Esta característica do sinal recebido permitiu estabelecer um novo ponto de partida, e assumir

que se o comportamento era razoavelmente periódico a média das amostras recolhidas nesse período (ou em múltiplos períodos) teria, em princípio, valores mais estáveis. Os resultados obtidos na análise subsequente encontram-se ilustrados no gráfico da figura 4.2: primeiramente arriscou-se um número de amostras $n = 20$, já plausível de ser usado numa aplicação prática – calcular-se-ia uma nova estimativa do RSSI com um período aproximado de 200 ms –, e foi-se reduzindo n gradualmente a partir deste valor. Verificou-se que, no seguimento da observação realizada, até $n = 10$ a instabilidade do gráfico que se obteve não era muito mais evidente que a conseguida para $n = 20$. Em compensação, ao diminuir-se ainda mais o valor de n o gráfico desenhado apresentou-se cada vez mais inconstante. Daqui se retirou a utilização de um filtro de média com $n = 20$ como sendo a melhor abordagem nesta primeira tentativa, ainda que o número de amostras possa ser reduzido até metade, no caso de a sua aplicabilidade ser colocada em causa, sem que tal represente um aumento incontrolável da variabilidade do sinal obtido.

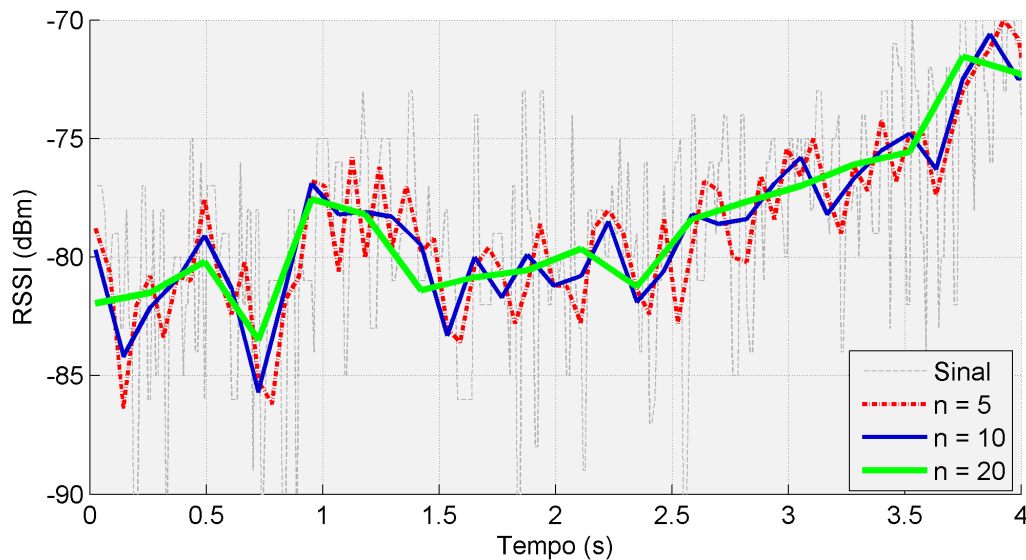


Figura 4.2: Resposta da primeira filtragem, a 1 m , em função do número de amostras.

A significativa melhoria na obtenção dos dados resultante da implementação do primeiro filtro ficou, ainda assim, aquém da estabilidade pretendida. No gráfico anterior são perceptíveis diferenças que chegam a atingir os 7 dBm em menos de meio segundo. Por muito que estes registos continuassem a ser explicados pela forte inconstância do sinal que se pretendia tratar, originando a ocorrência de *patamares* imperfeitos na forma do gráfico, o objetivo delineado não tinha sido atingido e, posto isto, era compreensível a necessidade de realizar uma filtragem ainda mais exaustiva e eficiente, mas sem comprometer mais os tempos de estabelecimento e atualização da sua resposta. Das opções enunciadas na secção 2.4 optou-se pela escolha de um filtro de Kalman simples, pela necessidade de uma solução tão rápida quanto eficaz, sem acarretar um aumento substancial da complexidade do algoritmo de filtragem.

Relembrando os fundamentos detalhados na mesma secção, a implementação prática de um filtro de Kalman pode ser realizada assentando na avaliação de três parâmetros, que no decurso desta explanação se tratarão ocasionalmente pela notação (Q, R, p) , a saber:

- p - covariância do erro das estimativas
- Q - covariância do ruído do processo
- R - covariância do ruído da medição

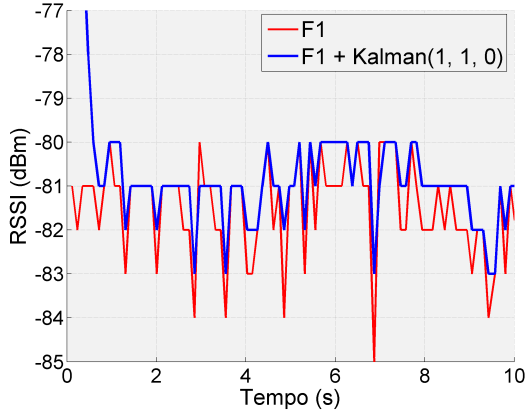
O filtro de Kalman é carregado inicialmente com o primeiro valor proveniente da execução do filtro 1, sendo atualizado à medida que cada novo valor é calculado. Em aplicações de maior complexidade, onde múltiplas variáveis contribuem para a dinâmica do sistema, os três parâmetros representariam matrizes, mas como neste caso apenas uma variável entrou em linha de conta – o RSSI – as matrizes de covariância simplificaram-se drasticamente num valor correspondente à variância do parâmetro pretendido. O dimensionamento do filtro, pela dificuldade em obter diretamente os parâmetros do sistema, foi realizado recorrendo ao *tuning* das variáveis. O único dos três parâmetros passível de ser estimado era R , por ser referente às medições efetuadas, sendo ainda assim necessário tomar o ruído da medição como uniforme e de um único tipo para que a variância pudesse ser calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma^2 = \sum_i (RSSI_i - \mu)^2 \quad (4.1)$$

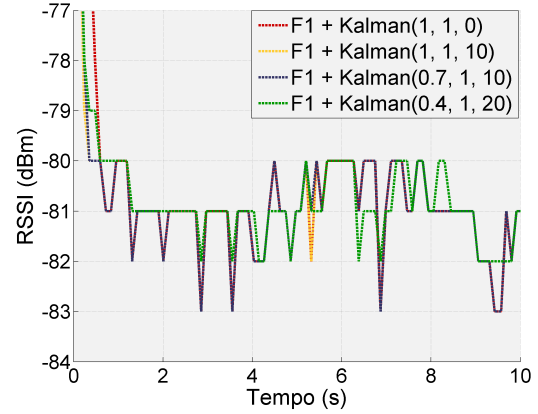
Do conjunto de medidas retirado à distância referenciada na implementação do filtro anterior, retirou-se que $\mu_{ref} = -82.22 \text{ dBm}$, permitindo obter a estimativa $R = 1.69$.

Inicialmente considerou-se que o erro associado às estimativas era uniforme ($p = 0$) e que a variância do ruído associado ao processo e à medição era a mesma (por questões de simplificação, $R = Q = 1$). A introdução do filtro de Kalman com estes parâmetros induziu de imediato uma significativa melhoria, que não se refletiu necessariamente na estabilidade da resposta mas sim na atenuação das variações existentes, conseguindo-se reduzir a amplitude de boa parte das mesmas em mais de 50% e colocando a resposta do algoritmo de filtragem dentro do objetivo traçado inicialmente. No entanto, como é visível na figura 4.3a, o filtro demorou quase 600 *ms* a estabelecer-se no resultado estimado, o que corresponde a 5 amostras erradamente calculadas. Cinco amostras com erro podem neste contexto ser facilmente ignoradas dado o reduzido intervalo de tempo que antecede a obtenção de medidas corretas, diluindo-se nos restantes termos calculados. Porém, se por mais uma vez se regressar ao paradigma da *TLSApp*, em que cada novo valor é lido dos *SensorTag* com um período de décimas de segundo, a aplicação de um filtro com estas características levaria a que o mesmo só retornasse um valor correto após mais de vinte segundos. Ainda que o algoritmo de filtragem permitisse já um assinalável aperfeiçoamento das leituras efetuadas, encontrando-se estas em muito melhores condições de ser analisadas, tornou-se necessário prosseguir com o ajuste dos parâmetros p , Q e R com a obrigatoriedade de reduzir o tempo de estabelecimento do filtro. A alteração dos valores e a posterior comparação evidenciada na figura 4.3b permitiram dar conta de mais algumas conclusões:

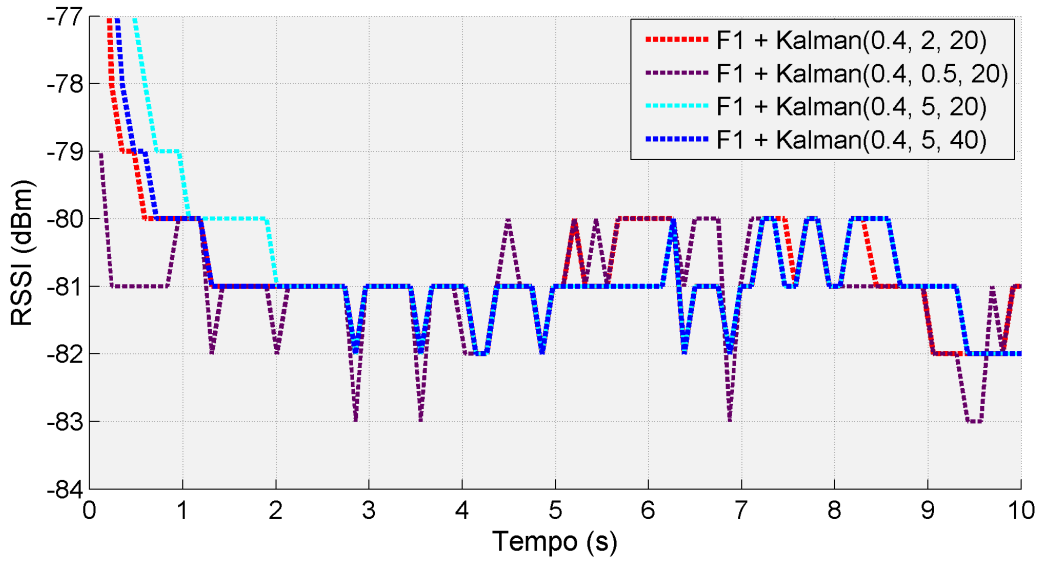
ao assumir-se que a covariância do erro das estimativas p era elevada, o filtro passou a evidenciar um carácter mais rápido, com um tempo de estabelecimento ligeiramente menor. Em contrapartida, a diminuição de Q de 1 até 0.4 tornou gradualmente a resposta mais estável e eliminou o ténue efeito de sobre-elevação que a mesma denotava, ainda que parcialmente à custa dos progressos conseguidos na diminuição do tempo de resposta. Com



(a) Alteração na forma do gráfico com a introdução do Filtro de Kalman.



(b) Comparação entre diferentes implementações do Filtro de Kalman.



(c) Comparação entre diversas implementações do Filtro de Kalman (2).

Figura 4.3: Dimensionamento dos parâmetros do Filtro de Kalman.

base nestes dados partiu-se para uma nova tentativa de estimar os parâmetros do filtro, cujos resultados se ilustram na figura 4.3c. Foi, de resto, ao variar o valor anteriormente calculado de R que se chegou à resolução do problema. Se uma alteração para $R = 2$ já produziu resultados relevantes, ao aumentar-se R para 5 alcançou-se uma resposta estável

com oscilações que não ultrapassavam os 2 dBm (no caso de o dispositivo de encontrar imóvel) para um RSSI próximo da sensibilidade do recetor. Infelizmente, o tempo de estabelecimento tornou-se ainda mais longo do que inicialmente, algo que só foi compensado com um aumento ainda maior da covariância do erro das estimativas para 40. Obtinha-se assim uma resposta bastante estável (além das expectativas criadas), mas com um problema que colocava em causa a sua aplicação em aplicações de menor débito de dados como a *TLSApp*.

Avaliando o peso dos dois fatores no âmbito do trabalho desenvolvido, concluiu-se que era necessário diminuir o tempo de estabelecimento do filtro de Kalman, mesmo que isso significasse ter que abdicar de alguma da estabilidade conseguida. Continuando a sequência do ajuste realizado até então (primeiro ajustara-se Q , depois p e finalmente R), faltava explorar a redução do último parâmetro. E, ao invés, a diminuição de R para valores menores que 1, em particular próximos de 0.5, levou à anulação quase total do tempo de estabelecimento da resposta. É certo que como consequência a resposta se instabilizou, apresentando um maior número de oscilações, mas estas mantiveram-se dentro de uma margem entre os 3 e os 4 dBm , de acordo com o pretendido para o desempenho do filtro.

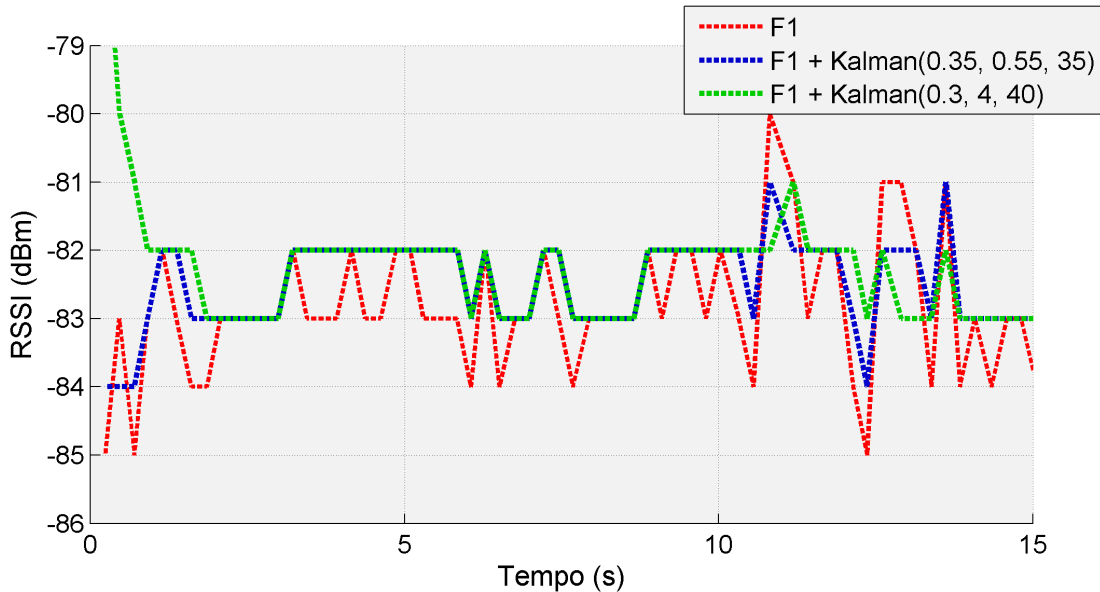


Figura 4.4: Progressão atingida com a introdução do método de filtragem de Kalman.

Ao analisar os valores circundantes, por forma a encontrar os parâmetros ideais, obteve-se o melhor desempenho com $Q = 0.3$, $R = 4$ e $p = 40$ para o filtro mais estável e $Q = 0.35$, $R = 0.55$ e $p = 35$ para o filtro mais rápido e globalmente tido como a melhor solução para o sistema proposto. Como fica demonstrado na figura 4.4, ainda que a solução adotada reaja de forma mais violenta a variações de maior amplitude, a implementação do filtro de Kalman acabou por resultar num aperfeiçoamento considerável do sinal recolhido, permitindo a associação entre o RSSI e uma distância com erro reduzido.

Com o desenvolvimento da *TLSApp*, aplicação que serve como principal interface entre

o sistema e o utilizador, a transição da análise realizada com o adaptador *LM506* para um *smartphone* permitiu confirmar, a propósito do referido no início deste capítulo sobre a transmissão intermitente dos *SensorTag*, que a potência máxima recebida pelo novo dispositivo – um *Sony Xperia M2* de 2014 que possui uma sensibilidade avaliada em -92 dBm – é superior à verificada no sentido oposto, atingindo os -35 dBm , mas fica bastante longe dos 0 dBm emitidos a espaços pelos *SensorTag*, diminuindo assim a gama de potências disponível em cerca de um terço. O período entre medições foi definido em 700 ms , após a realização de testes nos quais ficou claro que, independentemente de o hiato na transmissão dos *SensorTag* ser de sensivelmente 100 ms , os recetores demoram pelo menos 300 ms a efetivar a receção do sinal e sensivelmente outros tantos para assegurar o estabelecimento da medida e permitir o correto reinício da pesquisa LE (daí os tempos de pesquisa e de pausa serem ambos de 350 ms).

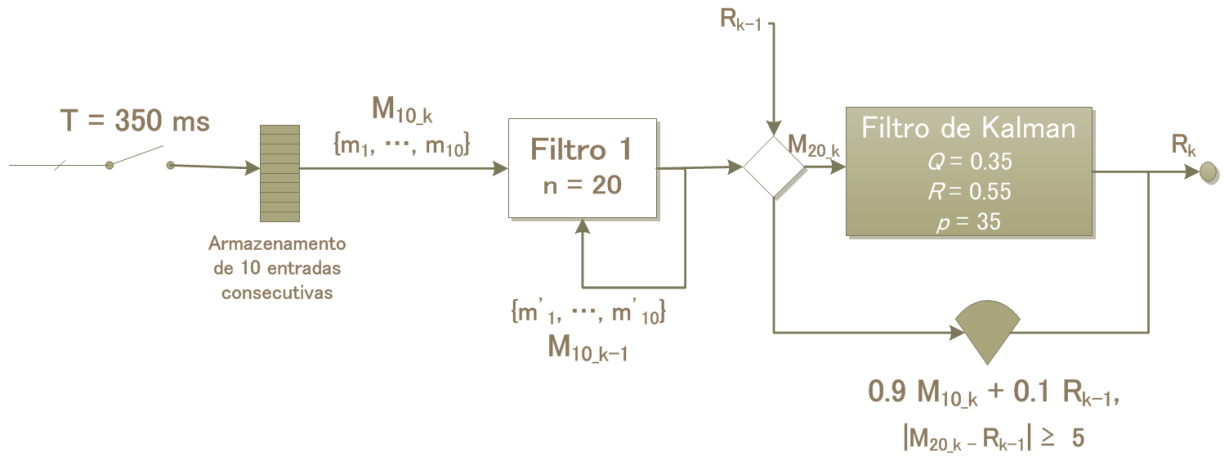


Figura 4.5: Diagrama de blocos do algoritmo de filtragem da *TLSApp*.

Devido ao período de recolha das amostras ser substancialmente superior ao modelado, durante o dimensionamento do sistema optou-se por aplicar o filtro 1 com apenas 10 amostras novas, utilizando as últimas retiradas para perfazer as 20 que são utilizadas no cálculo da média. A implementação do algoritmo de filtragem conseguiu os mesmos bons resultados, no entanto, a resposta do mesmo a variações substanciais da potência, coincidentes com deslocamentos efetuados pelo utilizador, tornou-se demasiado lenta, na ordem das dezenas de segundos entre os extremos da gama disponível. Para contornar esta contrariedade, estabeleceu-se que caso a diferença entre o valor calculado à saída do filtro 1 (na iteração k) e o último valor calculado pelo algoritmo de filtragem (na iteração $k - 1$) seja igual ou superior em módulo a 5 dB , o novo valor do RSSI é recalculado com uma ponderação de 90% da média das dez últimas amostras ($M_{10,k}$) e de 10% do último valor calculado (R_{k-1}), anulando quase na totalidade o peso das interpolações realizadas anteriormente no cálculo dos novos valores do RSSI e reduzindo substancialmente o tempo de estabelecimento da resposta, ainda que o valor exato (com margem de erro nula) continue a ser atingido no mesmo período de tempo.

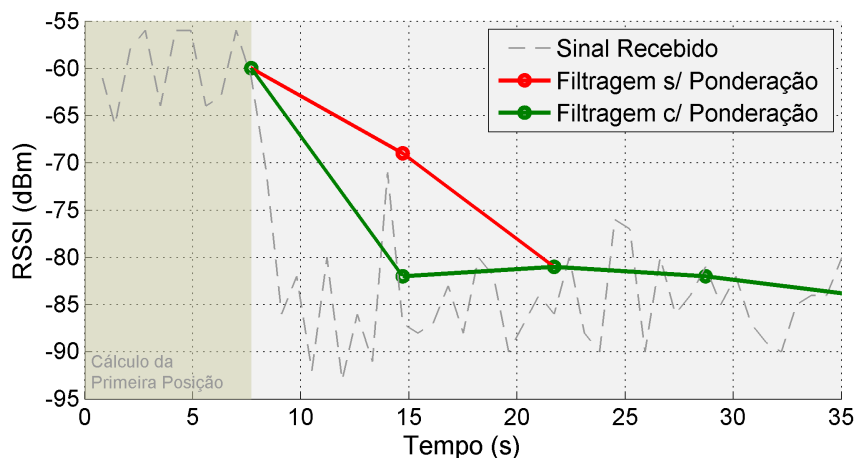


Figura 4.6: Progressão atingida com a introdução da ponderação na *TLSApp*.

4.3 Limitações

O tratamento dos dados do RSSI fornecidos pelos *SensorTag* permitiu finalmente a realização de testes *no terreno*, a fim de averiguar a validade dos resultados aí obtidos. Infelizmente, foi então possível descortinar diversas debilidades, que seguidamente se descrevem.

4.3.1 Disparidade nas Medições

Em termos totais, no decurso deste trabalho recorreu-se à utilização de 4 dispositivos *SensorTag*, identificados universalmente através do seu endereço MAC. Como fica patente a partir da observação dos endereços, o sensor 1 pertence a uma série mais antiga que os restantes, ainda que as diferenças entre ambas, relevantes ao nível do *firmware*, não impliquem – pelo menos em teoria – qualquer alteração no sinal transmitido.

Sensor	MAC Address
1	34:B1:F7:D4:FC:CE
2	90:59:AF:0B:83:CA
3	90:59:AF:0B:81:A1
4	90:59:AF:0B:8A:45

Tabela 4.2: Identificação dos *SensorTag* utilizados.

Num primeiro momento procedeu-se à análise da propagação do sinal de cada um dos sensores, colocando-os sobre uma superfície retilínea e medindo os valores recebidos a uma determinada distância. Com efeito, observou-se que os valores de RSSI obtidos a distâncias idênticas, com os sensores alinhados, não eram exatamente iguais. Supôs-se que esta disparidade se ficasse a dever à dificuldade de convergência do filtro de Kalman (que

apesar de possuir um tempo de estabelecimento reduzido, demora mais alguns segundos a assumir o valor exato do RSSI) e, por isso, optou-se por considerar somente os valores decorrentes da média de 20 amostras pelo filtro 1, antes de serem tratados pelo segundo filtro (M_{20k} na figura 4.5), por refletirem apenas os últimos valores recebidos. No entanto, a tendência para os valores recolhidos não serem os mesmos não se alterou, o que refutou a tese considerada. Esta tendência variável ocorria ocasionalmente e ia assumindo amplitudes ora reduzidas ora mais significativas – visto a potência média variar de cada vez que é realizada uma nova medida – e atingia no máximo os 5 dB. Num esforço mais minucioso, realizou-se a medição inserindo e retirando à vez os quatro sensores num mesmo ponto em vez de os ter colocados lado a lado – e de novo a tendência manteve-se.

Para tentar acompanhar esta linha de raciocínio realizou-se uma série de 20 ensaios, a uma distância entre 1 e 2 m, onde se retiraram durante 40 s valores da potência recebida por cada um dos *SensorTag* quando colocados exatamente no mesmo ponto. Por razões que ficarão mais claras nas subsecções seguintes, os sensores foram sempre orientados na direção do dispositivo recetor, mas este último foi colocado em diferentes posições para assegurar a necessária globalidade da conclusão a retirar. Verificou-se então que o recetor recebeu, em 70% dos casos, um maior nível de potência a partir do sensor 1 do que a partir dos restantes sensores, sendo os sensores 2 e 3 aqueles que demonstraram, em média, um menor alcance – em 60% dos casos o RSSI associado ao sensor 3 revelou-se menor que todos os restantes, alcançando uma média de 2.02 dB a menos que o RSSI proveniente do sensor 1.

Sensor	μ_{RSSI} (dBm)	σ_{RSSI}^2
1	-66.18	8.04
2	-68.15	7.45
3	-68.20	7.89
4	-66.84	12.14

Tabela 4.3: Resultados da análise realizada aos quatro *SensorTag*.

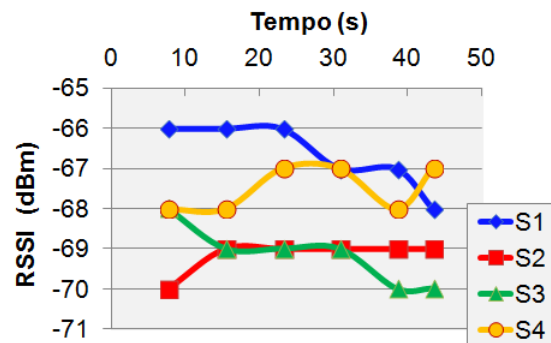


Figura 4.7: RSSI dos *SensorTag* quando alimentados pela mesma bateria.

Uma diferença média de tão só 2 dB nas leituras dos diversos sensores poderia, no âmbito do trabalho desenvolvido, resultar em não mais que pequenos erros no cálculo da posição do dispositivo, erros que seriam sempre explicáveis pela existência de fatores externos (que serão abordados mais à frente neste capítulo) ou mesmo por pequenos desfasamentos decorrentes do processo de fabrico e que se encontram dentro dos parâmetros considerados típicos para o dimensionamento e funcionamento da antena transmissora. No entanto, um outro pormenor considerado não tão comum contribuiu para adensar ainda mais as dúvidas relativamente ao comportamento dos *SensorTag*: em 54.5% das tentativas

realizadas a variância das medidas do sensor 4 foi claramente superior à dos restantes três sensores, o que resultou numa média das variâncias próxima do dobro. A juntar a isto, não será inocente o facto também anormal de as sucessivas pilhas que alimentaram este *SensorTag* no decurso do trabalho se terem consumido de uma forma mais acelerada que as restantes, apesar de pertencerem ao mesmo modelo e à mesma marca. Recorde-se que este sensor 4 pertence à mesma série que os sensores 2 e 3, que não apresentaram este tipo de comportamento, pelo que daí não foi possível extrair qualquer tipo de explicação. Também infrutífera se revelou a experiência em que se procedeu à recolha do RSSI dos quatro sensores com a mesma pilha: mesmo que por vezes as medidas recolhidas rondassem, em média, aproximadamente o mesmo valor, em boa parte das tentativas, de cujo resultado é exemplo o gráfico da figura 4.7, continuaram a observar-se pequenas discrepâncias, o que impediu a formulação de qualquer juízo acerca do papel das baterias no desempenho em potência dos *SensorTag*.

Como as dúvidas subsistiam, existindo sempre fatores capazes de explicar, mesmo que parcialmente, a ocorrência destes desfasamentos, recorreu-se à Câmara Anecoica presente no Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática (DETI) da universidade, que se encontra projetada para que seja possível conter qualquer tipo de ecos e reflexões dos sinais eletromagnéticos, o que se revelou útil para separar o sinal transmitido pelos *SensorTag*, embora ao contrário de outras câmaras esta não se encontrasse completamente isolada, o que permitiu a ocorrência de interferências de proveniência externa. Mesmo assim, para minimizar o mais possível estes níveis de ruído, todos os dispositivos presentes na sala foram desligados por altura da realização do teste, à exceção de um *router Wi-Fi* que não pôde ser desligado (e que, apesar de se encontrar a alguma distância, operava lamentavelmente na mesma gama de frequência do BLE).

Ao contrário do que seria suposto, como atestam os dados reunidos na tabela 4.4 e na figura 4.8, não foi perceptível qualquer diferença substancial nos resultados adquiridos. Nas três tentativas efetuadas para cada *SensorTag*, com o transmissor e o recetor separados por uma distância de cerca de 1.5 m, os resultados obtidos foram idênticos para ambos os sensores: a média das amostras variou numa gama pouco superior aos 3 dB, e no capítulo da variância os dados também não revelaram uma clara dissonância em relação aos resultados anteriormente obtidos, mesmo que duas das três tentativas realizadas com o sensor 3 tenham mostrado uma variância elevada, ao nível da do sensor 4.

O mais importante a reter desta experiência é, assim, a componente variável da potência transmitida pelos *SensorTag*, porque mesmo descontando o possível impacto do ruído externo, que nestas condições é reduzido, existem pequenas diferenças na transmissão realizada por cada um dos sensores em ligações consecutivas, ficando por provar a mesma ocorrência relativamente às diferenças existentes na potência média transmitida pelos diferentes sensores, onde também parece existir uma disparidade. Estas diferenças dever-se-ão provavelmente, como referido acima, a inconsistências na conceção da antena incorporada nos *SensorTag* e graças a isso dificilmente podem ser corrigidas de forma sistemática, devido à previsível aleatoriedade do comportamento em potência evidenciado por qualquer outro sensor que seja adquirido. Tal impõe um erro máximo de 2 a 3 dB no RSSI medido a partir dos sensores, que pode ser compensado recorrendo a uma análise do género

da realizada nesta subsecção (o que numa perspectiva funcional não é aplicável). Este é, porém, apenas o menor dos problemas relacionados com a implementação de um sistema deste tipo.

Sensor	$\mu_{RSSI} \text{ (dBm)}$	σ_{RSSI}^2
S1	-65.09	8.56
	-62.89	7.66
	-63.36	5.43
S2	-65.11	8.46
	-62.43	3.78
	-65.71	7.48
S3	-65.04	3.93
	-62.64	13.91
	-63.21	13.81
S4	-64.23	13.05
	-63.50	4.65
	-62.91	10.45

Tabela 4.4: Resultados da experiência na Câmara Anecoica.

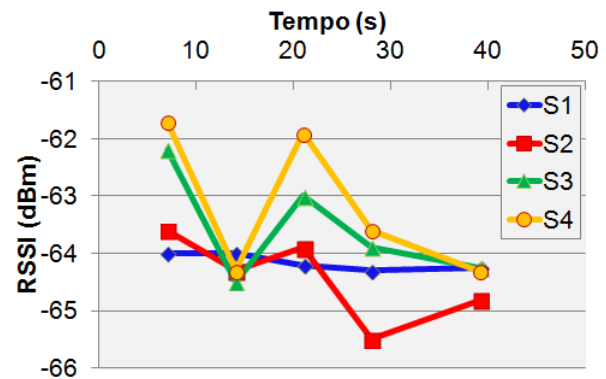


Figura 4.8: Variação média do RSSI durante a experiência na Câmara Anecoica.

4.3.2 Diretividade dos Sensores

Apesar de fornecer um extenso manual sobre o módulo *SoC CC2541* como complemento ao propriamente dito *Manual do Utilizador do SensorTag*, a *Texas Instruments* não disponibilizou neste manual qualquer informação relativa à antena incorporada no módulo e que funciona como elemento preponderante nesta dissertação, por muito que um normal utilizador do *SensorTag* não necessite destes dados. A única informação conhecida era que se tratava de uma antena em F-invertido (IIFA), integrada na placa de circuito impresso. Uma das referências mais úteis sobre esta antena prendia-se com a sua diretividade, que graças a esta omissão não foi suficientemente tida em conta na etapa inicial do trabalho, muito por conta da necessidade de efetuar a filtragem realizada na secção 4.2 para retirar os dados do RSSI de forma inteligível. Assim, quando pela primeira vez se tentou implementar o sistema num espaço suficientemente amplo, o comportamento da resposta em potência dos sensores colocados em rede foi surpreendentemente diferente da tendência até então apresentada nas medições em linha reta para um só sensor, observando-se que o ângulo compreendido entre a orientação do *SensorTag* e o *smartphone* assumia uma relevância tão pertinente quanto a distância que separava os dois instrumentos. Em alternativa a um novo recurso à Câmara Anecoica do DETI para desenhar os diagramas de radiação dos *SensorTag*, trabalho que implicaria a inutilização de um dos dispositivos pela obrigatoriedade de instalar um conector para controlar o sinal de teste (seria necessário impor à entrada da antena um sinal de características conhecidas para poder retirar conclusões sobre o ganho

da mesma), uma pesquisa mais exaustiva acabou por surtir na descoberta desses mesmos diagramas numa nota de aplicação associada a um outro dispositivo fabricado pela TI.

Um outro ponto a ter em consideração é a polarização das antenas. A polarização de um sinal eletromagnético descreve o plano sob o qual a onda é propagada, podendo a polarização ser circular ou linear (vertical ou horizontal). Para o que é relevante neste trabalho cumpre referir que a transmissão e receção de um sinal entre duas antenas lineares atinge o máximo ganho caso ambas possuam a mesma polarização; caso a polarização seja oposta (uma horizontal e outra vertical), a onda emitida encontrar-se-á em oposição de fase com a antena recetora, pelo que o sinal não será captado no destino. Neste caso específico, a análise dos diagramas de radiação deveria seguir a polarização que proporcionasse um maior ganho na transmissão entre as duas antenas, mas a polarização da antena recetora não era conhecida. Assim, para não comprometer a necessária apreciação da diretividade dos sensores, ilustram-se nas figuras 4.9 e 4.10 os diagramas de radiação com as duas polarizações, nos planos definidos como xOz e yOz – como assinalado nas figuras, y corresponde ao eixo vertical, x ao horizontal e z ao espacial, pelo que os diagramas apresentados correspondem à transmissão do sinal frontal e verticalmente. Infelizmente, qualquer que seja a polarização, verifica-se que os diagramas de radiação não se encontram próximos da omnidirecionalidade. Se no plano vertical se verifica uma maior constância no ganho da antena, o ganho no plano horizontal, que atinge o seu máximo cerca de 30° à direita da face frontal, pode ser vários dB inferior consoante a direção de propagação (até a um mínimo de 25).

Não bastassem as divergências de pequena escala verificadas entre aparelhos *SensorTag* do mesmo modelo, esta limitação toma dimensões muito mais comprometedoras, e neste ponto torna-se imperativo perceber que nenhuma estratégia de mitigação do problema evitará a existência de erros de medição sistemáticos. A diretividade irregular evidenciada pela antena leva a que, caso o sensor não se encontre orientado para o recetor com o ângulo mais favorável, a potência recebida pelo dispositivo seja menor do que a prevista. Mesmo que se orientem os sensores para que a maior área possível se encontre na direção de maior ganho da antena, existirão sempre posições que se encontrarão fora dessa área e, como é óbvio, o número de sensores disponível não é infinito. Desta forma é impossível conseguir, com uma boa margem de confiança, aplicar um algoritmo de localização a partir da conversão de potência para distância porque esta não representa uma função matemática, podendo consoante o ângulo de transmissão dos *SensorTag* existir diversas distâncias para um só valor de potência, o que torna possíveis acontecimentos tão inconcebíveis quanto um dispositivo receber níveis de potência semelhantes a partir de um sensor fixo na extremidade oposta de um espaço, a mais de oito metros, e de outro na sua proximidade mas que esteja orientado perpendicularmente. Estes problemas evidenciam também que o dimensionamento do sistema foi demasiado redutor no que diz respeito à aplicação do algoritmo de localização. Como a potência transmitida pelos sensores não é constante nos planos espaciais, a análise realizada num plano a duas dimensões é tremendamente inconsistente. A necessidade de incorporar as variações do RSSI decorrentes desta circunstância obrigaria a uma identificação do sinal nos três planos e à formulação de um algoritmo bastante mais complexo, capaz de medir a direção de proveniência do sinal e associá-lo com os respetivos

diagramas de radiação.

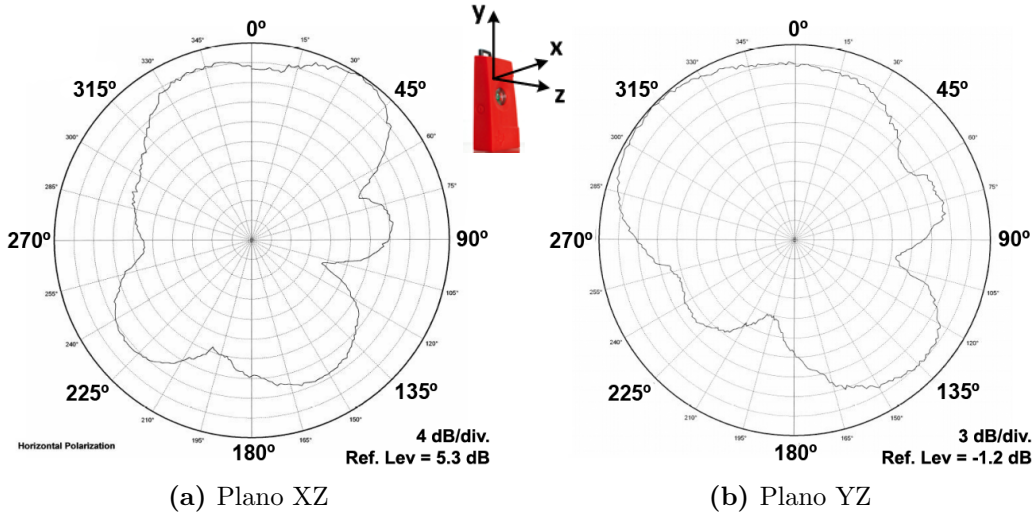


Figura 4.9: Diagrama de radiação da antena IIFA com polarização horizontal. [60]

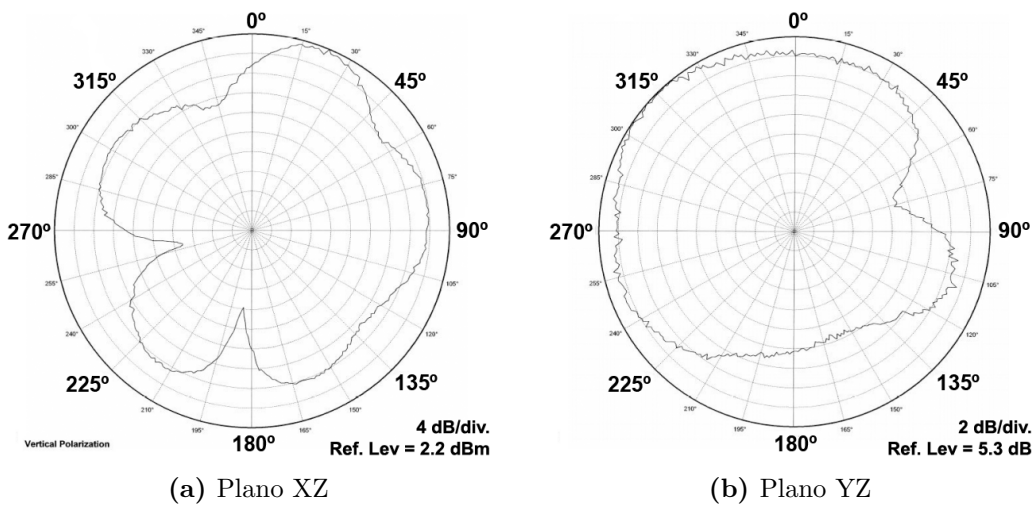


Figura 4.10: Diagrama de radiação da antena IIFA com polarização vertical. [60]

Mantendo o centro da análise no sistema dimensionado, tendo como base o diagrama de radiação dos *SensorTag*, onde se verifica que o RSSI diminui com o aumento do ângulo relativamente à orientação, compreende-se que a única forma de suprimir grande parte das diferenças é instalar mais sensores, de tal forma que o maior número de pontos num determinado espaço seja coberto por pelo menos três sensores orientados para si com um ângulo máximo de 45° . Numa sala de formato regular (quadrada ou retangular) esta progressão pode ser alcançada com a instalação de dois sensores em cada um dos cantos

do espaço, como se ilustra na figura 4.11, conseguindo-se uma diminuição significativa da inconstância imposta pelo ganho da antena na propagação do sinal no eixo espacial. Em espaços de configuração irregular o número de sensores a utilizar terá que ser superior, mantendo se possível o mesmo rácio de dois sensores por quina, sem contar com a existência de outros obstáculos dispersos pela área. O RSSI recebido em pontos à mesma distância continuará, no entanto, a apresentar diferenças notáveis, principalmente em virtude de a altura a que o *smartphone* se encontra também introduzir diferenças no ângulo descrito entre os dois dispositivos mas desta vez no plano yOz , mesmo que também aí se escolha uma orientação preferencial dos *SensorTag*.

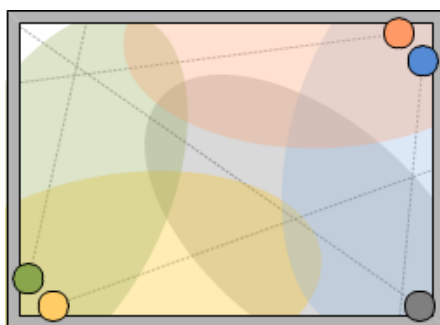


Figura 4.11: Arranjo dos *SensorTag* sugerido numa divisão de formato regular.¹

A repetição do processo de medição demonstrou que esta disposição não é por si só uma condição indispensável para que o sistema forneça resultados factíveis, mas atenua em grande medida o erro introduzido pela deficiente diretividade – o que é bastante importante, visto não se poder descurar a existência de uma condição de execução para o algoritmo de localização derivado em 3.3 que pode, não raras vezes, ser colocada em causa ao trabalhar com distâncias erradamente calculadas.

4.3.3 Diretividade dos Dispositivos Recetores

Tal como já foi referido, a antena recetora do *Sony Xperia M2*, utilizado na recolha dos dados enunciados nas análises anteriores, é capaz de receber uma potência máxima de -35 dBm , sem mesmo assim conseguir receber a totalidade da potência transmitida (que é por defeito de 0 dBm). Como é sabido, os módulos *Bluetooth* dos *smartphones* não são construídos pelo mesmo fabricante nem possuem as mesmas características, e tal significa que é previsível que a potência máxima percebida por outros modelos não seja igual. Logo, se a chamada *potência zero* não é a mesma, os valores retornados em função da distância vão ser diferentes, por muito que o comportamento da potência recebida não difira.

Por outro lado, a antena recetora dos dispositivos existentes no mercado varia não só nos modelos escolhidos bem como na posição que esta ocupa na superfície do aparelho. Em diversos modelos, a antena *Bluetooth* encontra-se integrada num módulo independente

¹Os diagramas de radiação exibidos na figura 4.11 não refletem a sensibilidade do recetor nem o formato do diagrama de radiação dos *SensorTag*, sendo por isso meramente ilustrativos.

juntamente com as antenas de *Wi-Fi* e GPS. Como, ao fazer uso das funcionalidades GPS disponíveis num telemóvel, o utilizador coloca tipicamente o dispositivo numa orientação vertical, segurando-o com os dedos apoiados na superfície inferior, os fabricantes optam habitualmente por instalar o módulo *GPS/Wi-Fi/Bluetooth* na metade superior do dispositivo para evitar que a transmissão e receção dos sinais seja atenuada pela presença humana, uma solução que também é pertinente na ótica deste trabalho. O *smartphone* utilizado possui, de resto, esta especificidade – trata-se naturalmente de um modelo existente no mercado, como tantos outros, mas é representativo da amostra disponível. Contudo, no tratamento dos dados do RSSI que se pretende que sirvam para determinar a distância entre o *smartphone* e um sensor, esta constituição levanta sérios problemas. A colocação do módulo recetor próximo da extremidade superior do *smartphone* leva a que, mesmo descontando qualquer interferência humana, os níveis de sinal recebidos pelo mesmo sejam superiores quando o sinal transmitido incidir na extremidade superior do dispositivo e inferiores caso provenham de uma orientação mais próxima da extremidade inferior. Para aferir a diferença na amplitude do sinal recebido que esta situação pode induzir, procurou-se negligenciar qualquer fonte externa de interferência e anotaram-se os níveis de potência recebidos pelo dispositivo, na situação em que um *SensorTag* se encontra a transmitir orientado para o mesmo e a uma distância de apenas 10 *cm*.



Figura 4.12: *Sony Xperia M2*.

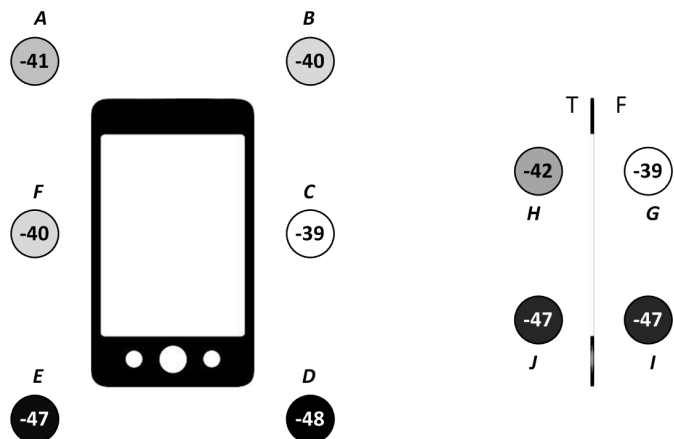


Figura 4.13: RSSI, em *dBm*, medido pelo *smartphone* a 10 *cm* de um sensor quando colocado em diferentes pontos.

Os valores inscritos na figura 4.13, resultantes da média de mais de uma centena de medidas retiradas em cada ponto, permitem aferir uma diferença máxima de 9 *dB* à volta do dispositivo, que ocorre precisamente entre as extremidades superior e inferior do mesmo e que se explica pelo facto de o *Sony Xperia M2*, à semelhança da generalidade dos *smartphones* comercializados atualmente, possuir uma forma marcadamente paralelepípedica ($13.97 \times 7.11 \times 0.86$ *cm*). É também assinalável que o RSSI medido junto a face do aparelho seja ligeiramente superior ao medido no verso, o que pode dever-se ao diagrama de radiação da antena recetora estar orientado para a frente ou à existência de

alguma camada protetora que obstrua o sinal emitido para trás. Note-se que estes desfasamentos existem para uma distância significativamente próxima do *smartphone* – para melhor se perceberem as proporções que este problema pode atingir, assumindo que o sinal se propaga sem qualquer tipo de obstáculos ou interferência aplica-se a fórmula de Friis, correspondente a uma propagação do sinal em espaço livre:

$$P_R \text{ (dBm)} = P_T + G_T + G_R + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (4.2)$$

Tendo em conta a proximidade entre o sensor e o *smartphone* a 10 cm é possível considerar a potência de radiação isotrópica equivalente (EIRP), $P_T + G_T \simeq P_{10cm}$. O ganho da antena recetora (do *smartphone*) é desconhecido, mas assume-se que será no pior dos casos unitário. Como $\lambda = c/f$, em que c é a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e f a frequência de operação, ter-se-á a dois metros, atendendo à fisionomia do telemóvel, a seguinte potência de sinal recebida:

Ponto	RSSI (dBm)	Ponto	RSSI (dBm)
A	-87	F	-86
B	-86	G	-85
C	-85	H	-88
D	-94	I	-93
E	-93	J	-93

Tabela 4.5: Estimativa do RSSI medido pelo *smartphone*, a 2 m do sensor, na situação de propagação em espaço livre.

Passando à frente da profunda queda dos valores do RSSI numa distância de dois metros (que se constata numa situação de espaço livre mas não se verifica em tão grande medida num ambiente interior), ainda que estes valores mantenham as diferenças existentes entre si é preciso fazer notar que, enquanto que para níveis de potência superiores uma diferença de 9 dB deverá implicar uma distância de alguns decímetros, na metade inferior da gama, próximo da sensibilidade do recetor, a mesma diferença implica um erro de metros – o que, por muito que represente um erro relativo inferior ao apresentado para potências superiores, pode em termos absolutos ser, por si só, superior ao erro apresentado por outros sistemas – e pode ser ainda pior se for finalmente levado em conta que, fruto da posição em que o *smartphone* é usualmente colocado, os sinais recebidos na direção da extremidade inferior do dispositivo são ainda mais atenuados pela existência de um obstáculo que é o braço do utilizador. Além disso, neste caso não é possível adotar uma resolução semelhante à referida para o problema de diretividade dos sensores, porque não é possível ao dispositivo perceber qual a direção de onde provém o sinal que está a receber. Uma solução possível para este problema passaria por utilizar o giroscópio incorporado nos *smartphones* (caso estes estivessem equipados com tal funcionalidade) para detetar a sua orientação e calcular o ângulo entre ambas as direções, mas dessa forma apenas seria tida em conta uma abordagem no plano (x, y) , esquecendo-se novamente que a altura a que o

sensor está colocado relativamente à posição do dispositivo condiciona a potência recebida. Avaliar a altura a que um utilizador segura o telemóvel relativamente ao solo seria, por si só, tema para um novo trabalho que envolveria a criação de *hardware* adicional, trabalho que seria ainda assim de parca utilidade no âmbito da análise pretendida, já que por força das sucessivas reflexões existentes em espaços interiores não seria garantido que o sinal transmitido fosse diretamente encaminhado do sensor para o *smartphone*, podendo este ser recebido no dispositivo móvel numa direção diferente daquela em que fora emitido.

Assim, qualquer que seja a potência do sinal transmitido por um qualquer *beacon*, esta não será recebida da mesma forma. Se pelos fatores apresentados nas subsecções anteriores se afigurava difícil a aplicação de um sistema que converta diretamente a potência recebida em distância, esta lacuna torna tal tarefa impossível sem que se tenham que assumir erros de precisão significativos.

4.3.4 Obstáculos e Interferência

Por entre a análise realizada na subsecção 4.3.1 um aspeto pode ter passado despercebido aos menos entendidos: no gráfico da figura 4.7, retirado a uma distância variável entre 1 e 2 *m*, a média do RSSI recebido a partir dos quatro sensores ronda os -66 a -70 *dBm*. Na figura seguinte, a uma distância de 1.5 *m* e na mesma orientação, os mesmos sensores retornam uma média de -64 *dBm*, com picos de -60 . Sendo a distância que separa o sensor do dispositivo recetor sensivelmente a mesma nos dois casos, numa abordagem simplista poderia pensar-se de que tal se deve às já referidas inconsistências na potência transmitida pelos *SensorTag*. Há, no entanto, outra diferença entre as medições realizadas: uma foi realizada numa sala comum, a outra numa Câmara Anecoica – e isto faz toda a diferença: não só o formato da sala em que se realizou a primeira medição é diferente do da Câmara Anecoica do DETI, esta última, embora não esteja isolada relativamente a interferências exteriores, consegue pelo menos anular o efeito de grande parte das mesmas.

O problema da influência de outros sinais na propagação do sinal transmitido pelos *SensorTag* já foi por diversas vezes referido ao longo desta dissertação mas nunca suficientemente detalhado. A tecnologia BLE, ao encontrar-se implementada na gama compreendida entre os 2.4 e os 2.45 *GHz*, coincide numa gama já extensamente utilizada por uma extensa lista de aparelhos e tecnologias *wireless*, a banda ISM. Desde os enormemente disseminados *routers Wi-Fi* passando pelos telefones sem fios, os comandos de garagem, sistemas de videovigilância, os periféricos portáteis que se ligam via USB e outros equipamentos industriais e científicos até aos micro-ondas que se usam nas cozinhas de todo o mundo, um sem número de aparelhos emite sinais à mesma frequência que os *SensorTag* e outros dispositivos *Bluetooth* e BLE. O problema com o módulo utilizado neste trabalho atinge outros contornos já que, ao contrário de boa parte dos aparelhos indicados, os *SensorTag* são dispositivos que funcionam e transmitem sinais com muito baixa energia e que se pretende que mantenham um alcance relativamente elevado. O grau de atenuação que a operação destes aparelhos pode infligir num sinal com estas características é fácil de averiguar com uma simples experiência, em que se colocam os dispositivos transmissor e recetor num ambiente corrompido com diversos sinais provenientes de outras fontes. Nesse

sentido, realizou-se uma série de cinco ensaios com um dos *SensorTag* e o *smartphone* separados por um metro numa divisão onde existiam dois dos instrumentos referidos.

<i>RSSI (dBm)</i> medido a 1 m de distância		
Dispositivo	Ligado	Desligado
<i>Router Wi-Fi</i>	-58.02	-57.31
Micro-ondas	-62.38	-57.23
Lab. Medidas RF - IT	-65.23	-61.94

Tabela 4.6: Experiência com os *SensorTag* e aparelhos interferentes.

A proximidade do *router Wi-Fi* considerado nesta análise não foi suficiente para provocar uma redução significativa do RSSI medido pelo telemóvel. Ao invés, uns bastante significativos 5 dB foram obtidos como diferença média entre a potência recebida se um aparelho do tipo de um micro-ondas se encontrar a funcionar nas proximidades. Este valor, ao contrário dos desfasamentos evidenciados na transmissão do *SensorTag*, já é demasiado grave para que a margem obtida se possa considerar desprezável – afinal de contas, trata-se de cerca de um décimo da gama disponível ocupada por possíveis erros, e note-se que os ensaios foram realizados apenas com um aparelho interferente. Em espaços ou edifícios equipados com múltiplos aparelhos eletrónicos a propensão para os níveis de RSSI serem afetados é igualmente significativa, como se verifica pelas experiências realizadas num dos laboratórios do Instituto de Telecomunicações (IT).

A interferência eletromagnética não é, todavia, a única a desempenhar um papel degenerativo na propagação do sinal transmitido: as características do espaço onde o sinal é difundido são tão ou mais importantes neste campo. Por se tratar de uma aplicação para localização interior, a propagação do sinal sofre com a interferência multipercurso na forma de fenómenos de reflexão, refração e difração. O sinal transmitido, ao contactar com uma parede (que mais não é que um meio de outra densidade e textura), divide-se num sinal que é absorvido pela divisória e noutro que é refletido, interferindo positivamente com o sinal transmitido. Este fenómeno é tendencialmente mais claro em divisões de menor dimensão, visto as paredes se encontrarem mais próximas, o que aumenta o número de reflexões. A sua intensidade é definida a partir do ângulo entre o sinal transmitido e a normal à superfície de contacto e depende, sobretudo, dos coeficientes de transmissão e reflexão do meio incidido que são, grosso modo, caraterísticos dos materiais utilizados na construção do edifício [61], mas mesmo assim é seguro afirmar que o RSSI medido num espaço de dimensão reduzida é tendencialmente superior ao RSSI, medido à mesma distância, num espaço de dimensão superior.

Para que melhor se pudesse compreender o peso que estes dois fatores podem ter nesta matéria recorreu-se à Gaiola de Faraday edificada na sala de Antenas e Sistemas RF do DETI. À semelhança da Câmara Anecoica, a Gaiola de Faraday é também um compartimento fechado, mas em oposição à primeira esta encontra-se isolada para evitar interferências eletromagnéticas externas e permite a existência de fenómenos de interferência multipercurso. A Gaiola possui um formato quadrangular e uma dimensão reduzida (cerca

de 5 m^2 de área), além de se encontrar coberta por uma superfície polida em alumínio que é boa condutora eletricamente e favorece a ocorrência de reflexões. Nestas condições, verificou-se que a recepção do sinal proveniente dos *SensorTag* a 1.5 m de distância dentro da gaiola obteve um RSSI médio de -50.95 dBm , mais de 12 dB acima do verificado à mesma distância na Câmara Anecoica, e uma variância superior a 16, indiciadora do elevado número de reflexões ocorrido. É certo que as condições simuladas na Gaiola de Faraday são impossíveis de igualar fora de um ambiente artificial, mas servem para auxiliar à conclusão de que simplesmente não é possível estabelecer uma relação universal entre o RSSI e a distância que separa um sensor do recetor, porque o mapeamento da potência em distância que se pretende realizar difere dos locais e dos ambientes em que o sistema é implementado – um RSSI de -65 dBm pode, como se observou, corresponder a uma distância de pouco mais de um metro num compartimento pequeno mas cheio de objetos interferentes, ou de mais de 5 metros num grande anfiteatro vazio. Esta imposição fica provada no gráfico seguinte, em que se estabelece uma comparação entre as conversões realizadas em diversos espaços e em diferentes condições de obtenção dos dados. Na situação (1) um espaço amplo, equipado com um grande número de dispositivos eletrónicos mas em que praticamente todos se encontram desligados; em (2) tem-se o mesmo espaço num dia de trabalho, com os aparelhos em constante operação. As situações (3) e (4) refletem em dois momentos distintos um outro espaço, de dimensão substancialmente inferior e saturado com interferência, ao passo que em (5) uma terceira divisão, sensivelmente do mesmo tamanho da segunda, se encontra livre de aparelhos interferentes.

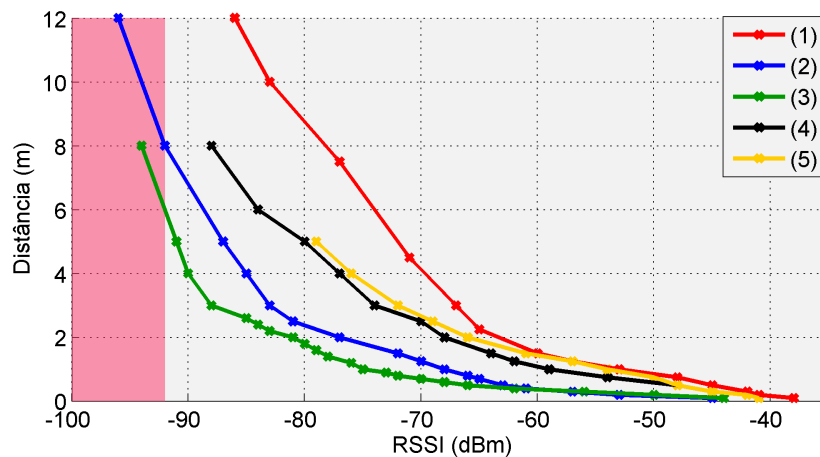


Figura 4.14: Relação entre o RSSI e a distância em espaços de diferentes características.

Por último, mas não menos importante neste acumular de inconsistência, não é suposto que os espaços onde se prevê implementar o sistema se encontrem vazios. Numa das subsecções anteriores fez-se referência à necessidade de povoar espaços que possuam formato irregular com um maior número de sensores, mas não se especificou a existência de outro tipo de obstáculos, sendo os mais relevantes estruturas como colunas ou estantes e armários que se encontrem dispersos pela área. Dependendo das suas dimensões (especialmente da

altura) estes podem funcionar como verdadeiras paredes, obstruindo quase na totalidade o sinal transmitido. Em certas ocasiões, este tipo de situação ocorre múltiplas vezes dentro de uma divisão e em zonas já de si próximas de paredes, pelo que as sucessivas reflexões acabam por redirecionar o sinal transmitido para o lado oposto do obstáculo. No entanto, este chega com uma potência bastante inferior à que seria previsível, fazendo com que mais uma vez o sistema assuma erradamente a distância a que esse ponto se encontra. Adicionar um sensor ao sistema nessas circunstâncias não resolve o problema – tal opção só é efetiva se se colocarem pelo menos 3 sensores nessa área para que todas as direções fiquem desimpedidas. Contudo, as próprias pessoas que circulam pelo espaço podem servir como obstáculos caso se coloquem, mesmo que parcialmente, em linha entre um sensor e os recetores. Isto é especialmente gravoso em locais como museus ou centros comerciais, em que o movimento de massas é bastante significativo. Mesmo que os transmissores sejam implementados a uma altura superior à de toda a circulação, o problema da obstrução não fica completamente resolvido já que os sensores passam a emitir numa direção oblíqua com a superfície, com os efeitos já conhecidos na potência transmitida, fruto de o diagrama de radiação ser assimétrico.

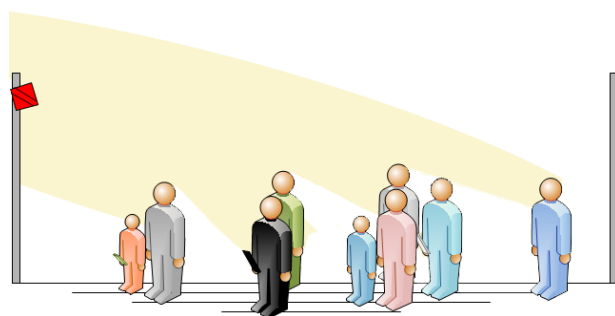


Figura 4.15: Representação do efeito de obstáculo que se forma em espaços com grande concentração de pessoas.²

Situação	RSSI (dBm)	
	s/	c/
Espaço Livre	-75.70	-83.09
(1)	-61.26	-68.49
(2)	-69.77	-77.26
(3), (4)	-73.00	-79.82
(5)	-64.07	-70.88

Tabela 4.7: Diminuição média do RSSI segundo a melhor orientação num percurso de 2.5 m e na presença de um obstáculo humano de 1.6 m de altura a meio caminho.³

Outra das consequências da existência destas zonas de sombra é que a distinção entre diversos pisos de um edifício, prevista na arquitetura do sistema, pode nem sempre ser corretamente aplicada. No sistema idealizado, o piso em que um utilizador se encontra é indicado pelo piso em que se encontra instalado o sensor mais próximo. Verifica-se, todavia, que um sensor pode ser detetado na divisão imediatamente acima ou abaixo da divisão em que se encontra com um RSSI máximo da ordem dos -80 dBm, um valor ainda acima da sensibilidade do recetor utilizado. Ou seja, a superfície entre pisos comporta-se

²Os diagramas de radiação exibidos nas figuras 4.15 e 4.16d tratam-se, na realidade, de representações esquemáticas de áreas com RSSI superior a um determinado valor. Não refletem a sensibilidade do recetor nem o formato do diagrama de radiação dos *SensorTag*, sendo por isso meramente ilustrativos.

³Os resultados obtidos resultam da média de trinta amostras realizadas nos cenários referidos, com e sem a presença do obstáculo.

praticamente como uma parede, e caso o número e disposição dos sensores numa divisão não seja o mais indicado existe a possibilidade, mesmo que remota, de o sensor tido como mais próximo se encontrar noutro piso que não aquele em que o utilizador se encontra – o que reforça a necessidade de existirem pelo menos três sensores por divisão.

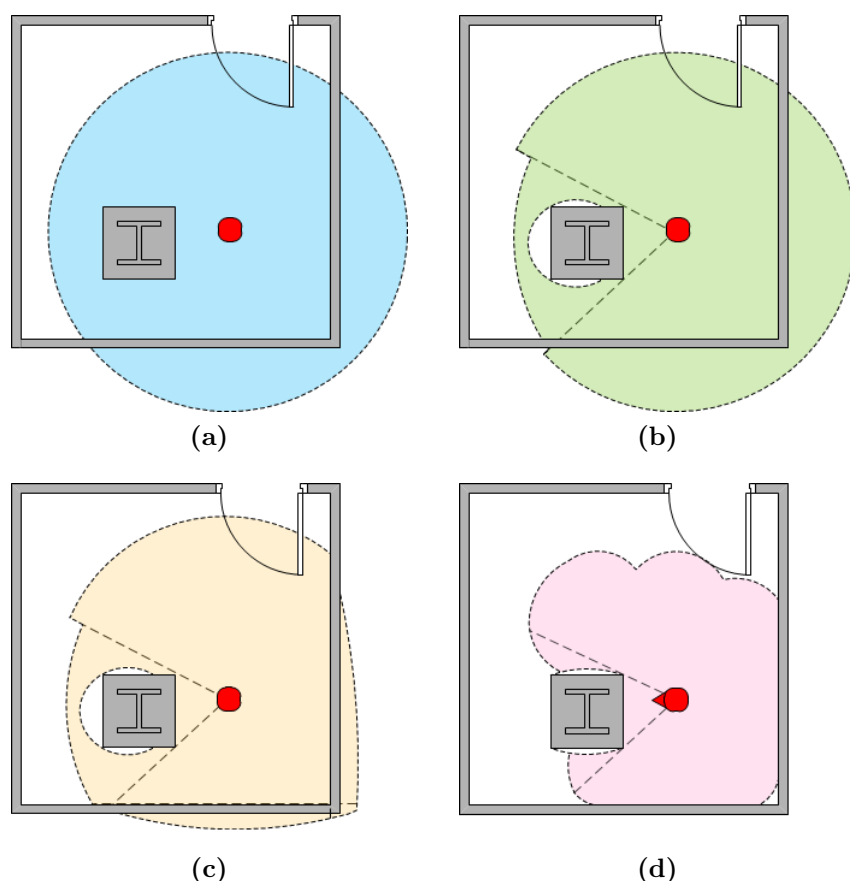


Figura 4.16: Esquema representativo dos fenómenos enunciados na presente secção.²

Atente-se, em jeito de resumo, às imagens da figura 4.16, que representam uma pequena divisão fictícia onde está instalado um sensor. Na situação ideal (ilustrada na alínea a)), o sensor radia potência aproximadamente da mesma forma em todas as direções, a despeito da existência de obstáculos à sua propagação, alcançando até uma determinada distância um RSSI superior a um certo valor. A situação b) espelha o que realmente ocorre quando o sinal transmitido pelo *SensorTag* na direção da coluna colide com a mesma: eventualmente uma pequena parte é difratada na coluna, enquanto que grande parte do sinal é refletido. Eventualmente, como o sensor também radia nas outras direções, o sinal acaba por ser refletido pelos obstáculos e chegar à retaguarda da coluna, sendo o RSSI menor quanto maior for a proximidade à mesma (visto ser uma região menos exposta a reflexões que as circundantes). Por outro lado, como já foi referido, a maior parte do sinal transmitido é refletida ao contactar com as paredes, pelo que só uma pequena parte da potência é recebida

na divisão oposta – como se ilustra na alínea c) da figura – e além disso o diagrama de radiação do *SensorTag* não é omnidirecional, o que transforma o diagrama no apresentado na alínea d) onde a forma geométrica perde definitivamente o aspeto circular, sinal da tremenda inconstância da relação entre o RSSI e a distância.

Serve esta descrição para concluir que são tantos os problemas e incongruências na transmissão, propagação e receção dos sinais emitidos pelos *SensorTag*, que a conjugação de todos os erros evidenciados nesta investigação resultará numa performance do sistema bastante abaixo da esperada, o que significa que, sem prejuízo de os transmissores escolhidos não terem sido provavelmente os mais adequados para este tipo de aplicação, a abordagem de tentar assimilar a localização de um dispositivo a partir da potência recebida a partir de outro dispositivo, sendo uma abordagem global, está longe de ser a mais fiável e precisa. Como alternativa à adoção do módulo da TI poder-se-ia pensar em proceder a um estudo exaustivo de outras alternativas existentes no mercado, a fim de averiguar se o diagrama de radiação das mesmas se encontra o mais próximo possível da omnidirecionalidade ou se este é, na melhor das hipóteses, menos irregular que o dos *SensorTag*, mas tal conduziria provavelmente a uma melhoria relativa no diagrama e a resultados pouco mais benéficos que os obtidos. Um outro tipo de solução que envolvesse, por exemplo, um agregado de antenas também seria difícil de replicar num grande número de espaços, o que colocaria em causa o princípio de universalidade a que a dissertação se propôs.

Ainda assim, as questões que se colocam encontram-se a jusante desta escolha, porque mesmo que a antena transmissora fosse isotrópica (radiasse com a mesma intensidade em todas as direções, conceito que é impossível de concretizar) o RSSI seria diferente em diversos locais de uma mesma divisão à mesma distância do transmissor, fruto das condições de propagação do sinal serem diferentes, para já não falar da receção que não é uniforme, dadas as características e a instalação das antenas recetoras, relativamente às quais a implementação de um sistema de localização é alheia, não sendo possível aplicar qualquer resolução (a não ser que se pretendesse criar um módulo recetor de raiz, o que seria extremamente lesivo pois limitaria grandemente a sua utilização pelo mercado). A utilização de outras técnicas, como as de aquisição de tempo, também não se revelariam proveitosas neste tipo de situação, devido às múltiplas reflexões que escamoteariam o tempo de propagação de um sinal em linha direta entre dois pontos. A utilização do RSSI através da técnica de *fingerprinting* afigura-se como uma forma de conseguir resultados mais positivos, mas obriga a um extenso mapeamento dos espaços em que o sistema é implementado, o que também coloca entraves à implementação global que é proposta, além de que também neste caso a volatilidade dos valores do RSSI se apresenta como um obstáculo à obtenção de bons resultados. Atente-se à seguinte experiência, realizada numa sala vazia com uma área de 22.5 m^2 ($5 \times 4.5\text{ m}$), em que o espaço foi dimensionado como se de uma matriz 5×5 se tratasse, sendo os quatro sensores colocados igualmente orientados para o seu centro e quatro medições do RSSI retiradas em simultâneo no centro estimado de cada célula da matriz. Para atingir a maior precisão possível seria necessária uma matriz com um maior número de linhas e colunas, que se refletiria numa menor área associada a cada célula e num maior e mais preciso número de medidas do RSSI, mas no essencial esta experiência permite mostrar que o mapeamento da potência obtido para os quatro sensores não apre-

senta resultados exatamente condizentes, como se verifica na figura 4.17. Às variações espaciais do RSSI vêm ainda juntar-se as variações temporais, decorrentes das perdas do sinal, por interferência de outros sinais ou mesmo entre os sinais emitidos por cada sensor.

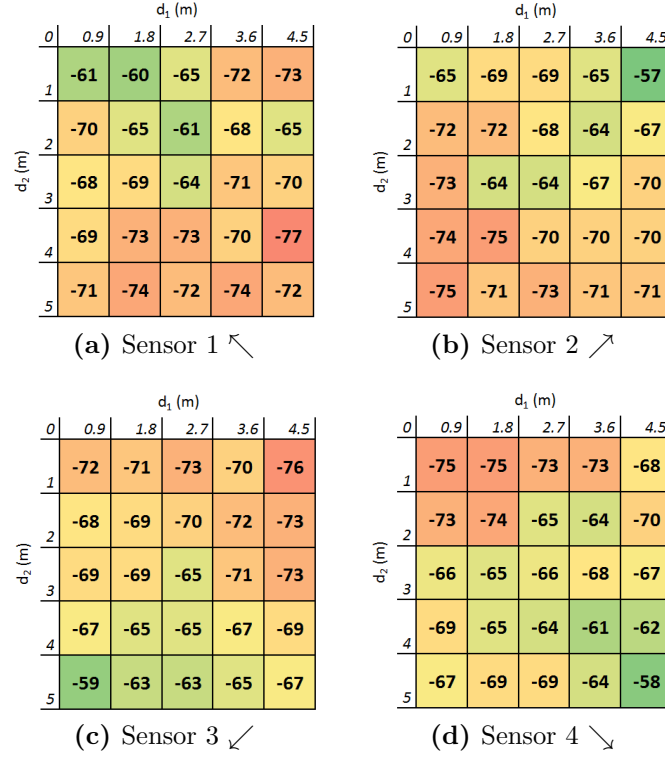


Figura 4.17: *Fingerprints* do sinal transmitido pelos *SensorTag* num mesmo cenário.

Em suma, não obstante as potencialidades que possui, a localização a partir de sinais *Bluetooth Low Energy* mantém os mesmos problemas que são verificados em outros sistemas *wireless*, possuindo a agravante em relação a estes de apresentar níveis de potência bastante baixos e de poder ser, por isso, facilmente afetada pelas diversas fontes de ruído que existam no meio em que se insere, o que reduz drasticamente o alcance das ligações e coloca em causa a performance de qualquer sistema que se tente implementar, por muito que se apliquem algoritmos de filtragem bastante eficazes. Quando a 2 m de distância se recebem filtrados apenas -60 dBm (que equivalem a um diminuto *nanowatt* em unidades lineares) é difícil conferir fiabilidade a qualquer sistema de localização que pretenda realizar a cobertura de todo um espaço. Como de resto foi referido no início deste capítulo, caso a relação sinal-ruído seja suficientemente “elevada” – como ocorreu na grande maioria das situações retratadas – a potência recebida é suficiente para que o sinal possa ser considerado a uma distância respeitável, mas existe o risco, em ambientes onde o nível de ruído seja superior, de o sinal emitido se desvanecer completamente, incapacitando a sua receção a poucos metros de distância. Desta forma, os procedimentos e técnicas a desenvolver para que se consigam alcançar resultados verdadeiramente positivos, fazendo uso desta tecnologia,

4. Tratamento dos Dados

terão que ser ainda mais efetivos.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Precisão das Estimativas

5.1.1 Cenários de Teste

Para testar o funcionamento do sistema foram escolhidas duas localizações de diferentes características: a primeira, a sala de trabalho adjacente ao laboratório de radiofrequência do Instituto de Telecomunicações, um espaço amplo, com quase 100 m^2 de área e livre de obstáculos de grande dimensão, com a exceção de um armário e um pilar localizados nas proximidades de um dos cantos do espaço. O segundo espaço escolhido foi um apartamento T2, localizado na cidade de Aveiro, de dimensão substancialmente mais reduzida e com a agravante de se encontrar dividido em diversas divisões, sendo que a maior possui uma área de apenas 18 m^2 .

Os testes realizados serviram-se de quatro *SensorTag* distribuídos pelos espaços selecionados, por forma a tentar abranger a maior área possível, e incluíram duas etapas. Numa primeira fase estudou-se o comportamento estático do sistema, selecionando-se os pontos que se julgaram de maior representatividade em cada um dos espaços e, para cada um dos mesmos, recolheram-se dez estimativas da posição do dispositivo quando colocado nesses mesmos pontos. Numa segunda fase testou-se o comportamento dinâmico, realizando-se a velocidade constante um percurso num dos espaços considerados e recolhendo-se as coordenadas do seguimento da posição. Note-se que o número de sensores utilizado foi escolhido meramente por motivos logísticos, pelo que não foi possível seguir algumas das diretrizes aconselhadas no capítulo anterior e, dessa maneira, os resultados obtidos devem ser analisados como um “pior caso”, porque não refletem completamente o potencial do sistema por muito que este fique aquém das expectativas. De outra forma, também é de ressaltar que a distribuição dos sensores disponíveis pelos dois cenários nem sempre obedeceu aos critérios mais óbvios (e presumivelmente mais corretos), mas foi realizada para abranger o maior número de situações distintas.

5.1.2 Cenário 1

A planta da sala RF do Instituto de Telecomunicações encontra-se ilustrada na figura 5.1. A sala tem cerca de 92 m^2 de área (correspondentes a um comprimento total de 12.2 m), e à exceção do pilar e dos conjuntos de mobiliário existentes na proximidade de um dos cantos da sala, todo o espaço restante, não obstante a existência de mesas e aparelhos eletrónicos, encontra-se suficientemente desimpedido para assegurar a normal propagação do sinal. Os ensaios foram realizados num ambiente em que apenas uma pequena parte dos aparelhos se encontrava ligado, pelo que os níveis de interferência também não eram especialmente significativos. Estavam, assim, reunidas as condições de propagação de sinal normais para um espaço deste tipo. Na figura seguinte a localização dos sensores está ilustrada a vermelho, juntamente com uma seta a indicar a sua orientação frontal, tal como ilustrado na figura 4.9; a planta fica completa com os seis pontos de teste considerados, que foram seleccionados com uma maior incidência nos pontos mais próximos das extremidades da sala.

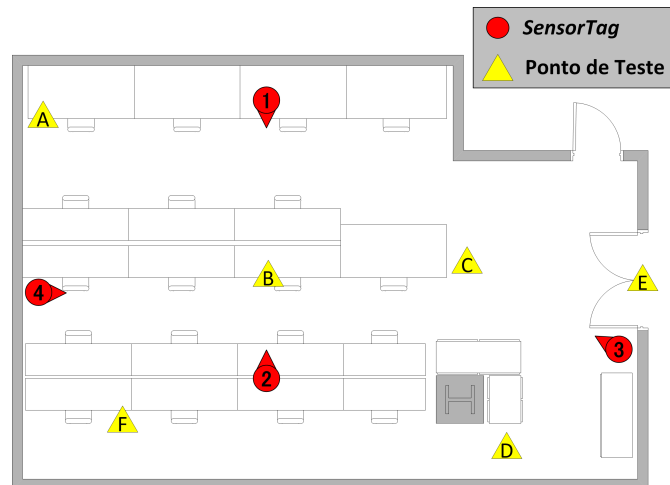


Figura 5.1: Planta da sala RF do Instituto de Telecomunicações.

A precisão média alcançada em cada um dos pontos de teste está enunciada na tabela 5.1. Verifica-se que quando existem pelo menos três sensores próximos e em linha de vista, o que acontece nos pontos A, B, C e F, se obtém uma precisão média das previsões de 3.11 metros, nos quais quase 80% das estimativas tem um erro inferior a 5 m . Ainda assim, os resultados obtidos nestes quatro pontos não são iguais.

Como é natural, o sistema comporta-se com muito melhor qualidade nos pontos B e C, que estão localizados no centro da sala e ao alcance dos 4 sensores. O ponto B beneficia diretamente de os três sensores mais próximos se encontrarem em linha de vista e orientados numa direção próxima daquela em que se encontra, sendo aí que se registam os melhores níveis de precisão. O ponto C representa um caso semelhante, ainda que desta vez apenas dois sensores se encontrem na direção de orientação, um dos quais o que se encontra mais longe. Devido a isto, a potência recebida no ponto C a partir dos sensores colocados no

centro da sala é inferior à que deveria ser verificada, aumentando o erro de precisão ainda que de forma pouco significativa.

Ponto	Precisão média (m)	Variância	Estimativas inválidas (%)
A	4.44	0.08	0
B	1.32	0.52	0
C	1.54	0.60	0
D	3.57	3.78	70
E	0.97	0.59	70
F	5.15	0.49	0

Tabela 5.1: Precisão e variância das estimativas realizadas no cenário 1.

A qualidade da posição obtida deteriora-se quando estas condições não estão reunidas. Os pontos A e F têm em comum com os anteriores o facto de se encontrarem numa zona povoada por sensores mas as semelhanças ficam-se por aí, visto ambos se encontrarem nos recantos do espaço e serem prejudicados pelos ângulos mais sombrios do diagrama de radiação dos sensores. No ponto A, o sensor mais próximo encontra-se precisamente à direita do recetor, enquanto que os outros dois sensores que compõem a trilateração se encontram numa direção diagonal; desta forma, a potência recebida pelo sensor mais próximo (-78 dBm em média) é menor que a dois outros sensores e pouco superior à que chega vinda do sensor 3 (-81), que se encontra próximo da porta a mais de 11 m de distância. No ponto F os ângulos estabelecidos entre sensores e recetor não são tão acentuados, mas como o sensor 1 faz um ângulo de cerca de 30° com o recetor (ou seja, transmite próximo do máximo de potência nessa direção), enquanto que os restantes se encontram mais próximos da zona de menor transmissão, a distância que separa este sensor do ponto de teste é calculada como sendo semelhante à dos restantes quando na realidade é de quase oito metros, o que impõe um erro bastante significativo.

No que diz respeito ao ponto E, localizado próximo da porta, apenas um dos sensores se encontra nas suas proximidades, ao passo que os restantes se encontram demasiado afastados, e ocorre de novo a situação em que o sensor mais longínquo se encontra em linha direta com o ponto recetor, enquanto que os outros não têm a mesma orientação. Posto isto, nos casos em que o RSSI associado aos dois sensores intermédios consegue ser superior ao do sensor mais afastado (apenas três em dez), o algoritmo consegue calcular a posição com uma precisão bastante boa, mas quando tal não acontece a posição dos mesmos sensores é estimada como estando mais longe do que a realidade atesta e, desta forma, as circunferências formadas pela conversão do RSSI dos mesmos não se interseitam com a circunferência relativa ao sensor mais próximo, invalidando a estimativa. Esta lacuna poderia ser solucionada com a instalação de um novo sensor, localizado no canto da sala mais próximo da porta, e de outro no corredor exterior à sala, que em virtude de se encontrarem mais próximos permitiriam realizar o cálculo de forma mais precisa. Finalmente, no caso do ponto D a situação é bastante mais sensível, por se verificarem os

fenómenos já analisados na subsecção 4.3.4. Na prática só um dos sensores se encontra em linha de vista com o recetor – os outros estão tapados pelo conjunto obstrutor –, pelo que o sinal proveniente dos restantes chega fortemente atenuado, impedindo a correta aplicação do algoritmo.

Para terminar a análise ao cenário 1 avaliou-se o comportamento dinâmico do sistema num espaço do género, e para isso percorreu-se por quatro vezes uma volta incompleta à sala a uma velocidade aproximadamente constante de 1 m/s . Os resultados são, como atesta a figura 5.2, bastante instáveis. Nos seguimentos assinalados pelas linhas amarela e castanha a quarta estimativa da posição do dispositivo revelou-se inválida, pelo que as linhas tracejadas que seguem o percurso realizado até ao último ponto calculado se tratam de representações fictícias:

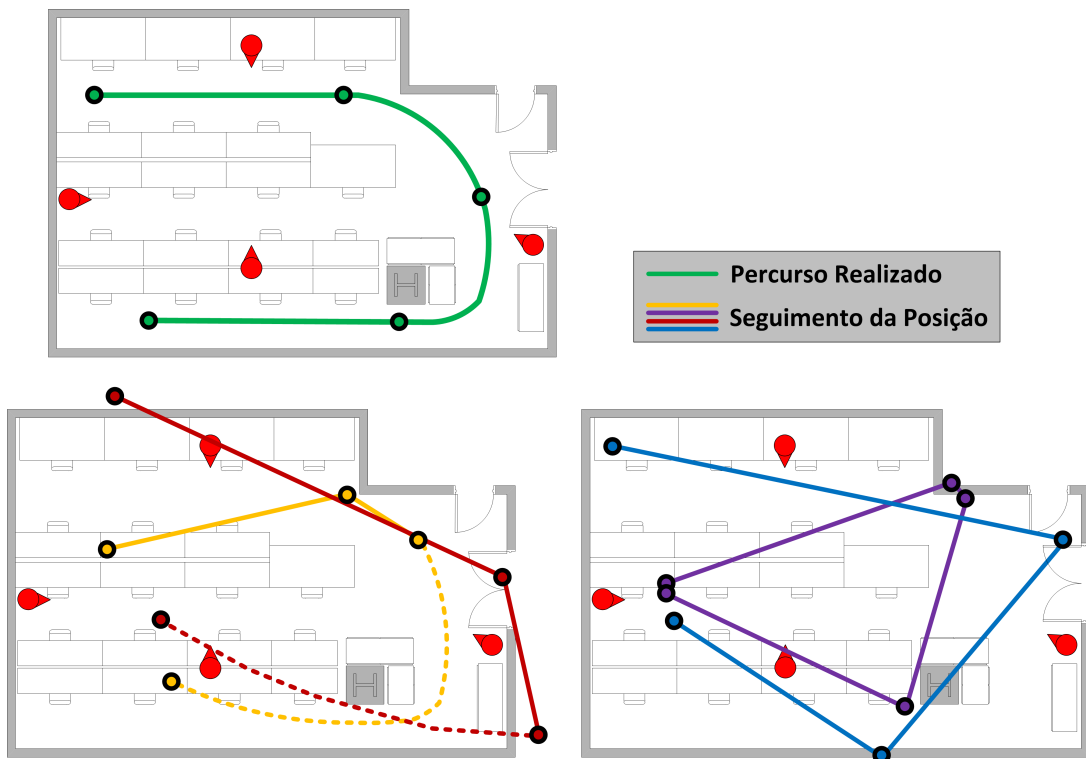


Figura 5.2: Seguimento da posição no cenário 1.

5.1.3 Cenário 2

A inclusão deste segundo cenário foi pensada, sobretudo, com o propósito de vincar as principais virtudes e defeitos deste sistema, como complemento aos aspetos referidos no capítulo anterior, mesmo sendo previsível que os resultados fossem ainda mais esmorecedores do ponto de vista da precisão que os obtidos no cenário 1. Por se tratar de um apartamento pequeno, cujas divisões são também menos espaçosas e interligadas por um pequeno e curvilíneo corredor, a existência de paredes e divisórias propicia a existência de condicionamentos à propagação do sinal, obrigando a reflexões e à perda de intensidade.

São apresentados três pontos de teste que reúnem os pontos-tipo que podem ser encontrados neste cenário. Para que se conseguisse perceber o impacto da existência de três sensores por cada divisão, situação que seria teoricamente a ideal, o ponto A foi situado no centro da sala do apartamento, divisão onde se encontram instalados três sensores. Ainda dentro da sala encontra-se o ponto de teste B, que difere do ponto A por se encontrar atrás de um armário de grande porte, que funciona como barreira em relação a um dos sensores. Por último, o ponto de teste C, que se encontra no centro do apartamento, recebe os sinais dos sensores que estão dispostos nas extremidades das restantes divisões da casa. Acresce referir que, ao contrário do sucedido no cenário 1, como os ensaios tiveram lugar num bloco de apartamentos foi impossível controlar a quantidade de aparelhos interferentes no ambiente em que as medidas foram retiradas, sendo certo que os dados evidenciaram um menor RSSI recebido à mesma distância quando comparado com a sala RF do IT, um acontecimento contraditório e indiciador da existência de perturbações no meio – a menor área das divisões do cenário 2, conforme explicado no capítulo anterior, deveria implicar um maior RSSI, graças à ocorrência de um maior número de reflexões.

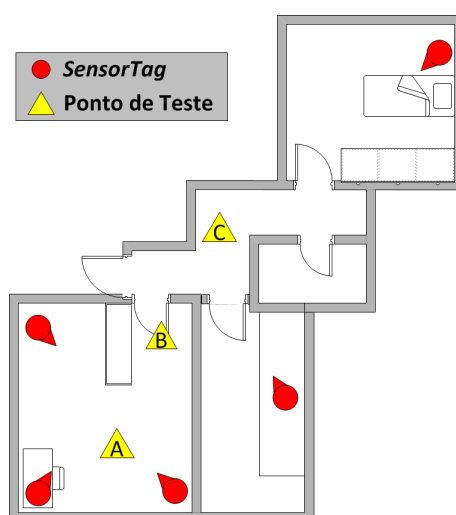


Figura 5.3: Planta do apartamento usado como cenário de teste.

Ponto	Precisão média (m)	Variância	Estimativas inválidas (%)
A	0.65	0.06	0
B	1.99	1.17	0
C	2.96	1.31	70

Tabela 5.2: Precisão e variância das estimativas realizadas no cenário 2.

A colocação de três sensores numa mesma divisão leva a que no ponto A, localizado no centro da mesma com dois dos três sensores diretamente orientados para o recetor, o sistema

cumpra verdadeiramente a sua função obtendo uma precisão média bastante positiva. Das dez estimativas realizadas, apenas uma apresentou um erro ligeiramente superior a um metro, o que se saldou numa precisão média de apenas 65 *cm*. No ponto B, a existência de um obstáculo entre o dispositivo e um dos sensores (por sinal o mais próximo) proporciona uma indesejada mas esperada deterioração dos níveis de precisão, dado que a manifesta proximidade (2.7 *m* contra 3.5 e 4.2) não se reflete na potência recebida pelo dispositivo, que é na maior parte das vezes inferior.

No ponto C optou-se por realizar um teste diferente, sendo que dos três sensores existentes na sala se manteve apenas o mais afastado deste ponto, localizado na extremidade contrária da divisão. O ponto C ficou assim localizado a uma distância de 5.3 *m* do sensor localizado na sala e a 4.3 *m* do sensor colocado no quarto. O terceiro sensor considerado estava mais perto, a 3.6 *m*, mas parcialmente tapado por uma parede. Dado o número reduzido de sensores colocados por divisão (um em cada) e a sua disposição, pela primeira vez nenhum dos sensores pôde estabelecer uma *linha de vista* direta com o ponto de teste, pelo que o sinal foi obrigado a propagar-se por entre diversos obstáculos até chegar ao recetor. A potência recebida a partir de ambos os sensores – abaixo dos -80 *dBm* – não refletiu a distância real entre os pontos considerados e levou a que apenas três das dez estimativas se revelassem válidas, com um erro médio de quase 3 *m*, bastante significativo para um espaço de dimensões tão reduzidas.

5.1.4 Análise

Os dados calculados no conjunto dos dois cenários saldaram-se numa precisão média de 2.51 *m*, com 77% das estimativas validadas. Relativamente à dimensão dos espaços, verifica-se que o erro apresentado é em média de 26.3%, sendo bastante inferior no centro das divisões (erro $< 15\%$ nos três pontos considerados) do que nas extremidades, onde pode facilmente chegar aos 40-50%.

Para lá da conclusão mais recorrente, que complementa a análise realizada na secção 4.3, de que o sistema só se afigura como uma boa alternativa em situações muito particulares, as experiências realizadas nos cenários de teste permitem retirar que é primordial que as distâncias calculadas, mais que proporcionais entre si, sejam o mais precisas possível para que os resultados sejam considerados válidos. Se as distâncias calculadas forem menores que as reais as circunferências não se interseitam, o que produz um resultado inválido. Assim sendo, seria preferível que a distância fosse calculada por excesso do que por defeito, mas tal tende a causar erros de precisão bastante significativos. Além disso, como a relação RSSI-distância na gama disponível não é linear nem constante, assumindo uma forma próxima de uma exponencial negativa – tal como se observa na figura 4.14 – e variando dentro dos próprios espaços consoante a existência de obstáculos ou interferências, o ajuste de uma relação do género acaba por calcular a distância por defeito para certos valores de RSSI e em excesso para outros, o que resulta em erros mais ou menos consideráveis, tal como se verifica, de resto, ao ajustar o mapeamento do cenário 2 ao teste realizado no cenário 1: os resultados obtidos são globalmente piores à exceção do ponto A, onde se consegue uma precisão média um metro e meio superior.

Ponto	Precisão média (m) [<i>Estimativas inválidas (%)</i>]	
	Relação Original	Relação Cenário 2
A	4.44 [0]	2.87 [0]
B	1.32 [0]	1.62 [0]
C	1.54 [0]	2.04 [0]
D	3.57 [70]	5.18 [90]
E	0.97 [70]	– [100]
F	5.15 [0]	4.67 [0]

Tabela 5.3: Precisão das estimativas do cenário 1 com diferentes relações de conversão.

5.2 Performance do Servidor Remoto

Por muito que o serviço prestado pelo TLS não apresente resultados satisfatórios, o sistema dimensionado é um sistema funcional e, por isso, deve estar blindado contra a existência de falhas e exceções inesperadas que comprometam a sua execução. Um dos potenciais focos problemáticos centra-se na base de dados alojada *online*, sendo imperativo garantir os níveis de eficiência suficientes para que o funcionamento do sistema na sua globalidade não seja colocado em causa, isto é, que o tempo de resposta do servidor não seja fortemente inflacionado no caso de um número substancial de utilizadores efetuar um pedido no mesmo instante (em paralelo).

O protótipo do sistema apresentado no capítulo 3 permite que sejam realizados três tipos de pedidos à base de dados: a seleção de um, dois ou três pares latitude-longitude pela *TLSApp* (1), consoante o número de pares de coordenadas já conhecidos pelo programa, e a inserção (2) ou atualização (3) dos dados de um novo sensor pela aplicação *System Management*. A base de dados desempenha ainda outras tarefas, como a gestão das contas de utilizador, acedidas por cada detentor para monitorizar e alterar a rede de sensores instalada num espaço. No entanto, como parte destas tarefas é responsabilidade do administrador do sistema, que procederá à validação da informação, não será previsível a ocorrência de sobrecargas no acesso a esta tabela.

```
(1) SELECT latitude, longitude FROM <user_table> WHERE sensor_id =
<sensor_id>;
(2) INSERT INTO <user_table> VALUES (sensor_id, latitude, longitude, date);
(3) UPDATE INTO <user_table> VALUES (sensor_id, latitude, longitude, date);
```

As três instruções passíveis de causar maiores atrasos na resposta do servidor aos pedidos são, assim, as evidenciadas na caixa anterior. Para averiguar o seu desempenho criou-se um programa que estabelece a ligação à base de dados e efetua de seguida uma das *mysql_queries* enunciadas na caixa anterior. A base de dados foi povoada com um total

5. Resultados

de cerca de um milhar de entradas, correspondentes a 23 utilizadores diferentes, de forma a simular o comportamento do servidor em plena operação. O programa foi então executado paralelamente um número n de vezes, tendo-se medido os tempos médios de resposta.

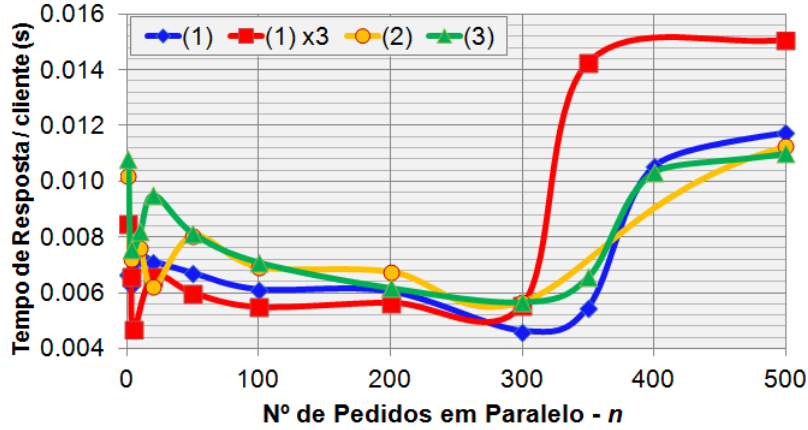


Figura 5.4: Tempo médio de resposta do servidor por cada pedido efetuado.

O tempo despendido pelo servidor na resposta a cada pedido efetuado é em média de 8.2 ms, podendo variar entre as milésimas de segundo e pouco mais de uma centésima de segundo por cada pedido, mesmo quando o número de pedidos paralelos é da ordem das centenas. De resto, é interessante verificar que o servidor consegue o máximo de eficiência para um número próximo das 300 *requests* em paralelo, perdendo gradualmente essa capacidade com a sobrecarga de pedidos. Esta particularidade fica bem patente na resposta do servidor a pedidos do tipo *triple select*: até cerca de 300 pedidos em paralelo, o tempo de resposta por pedido é inferior ao das restantes *queries*, invertendo-se essa tendência de forma clara para maiores valores de n .

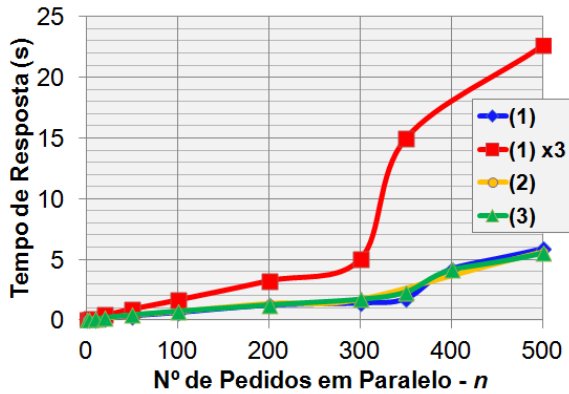


Figura 5.5: Tempos de resposta do servidor aos pedidos efetuados à base de dados.

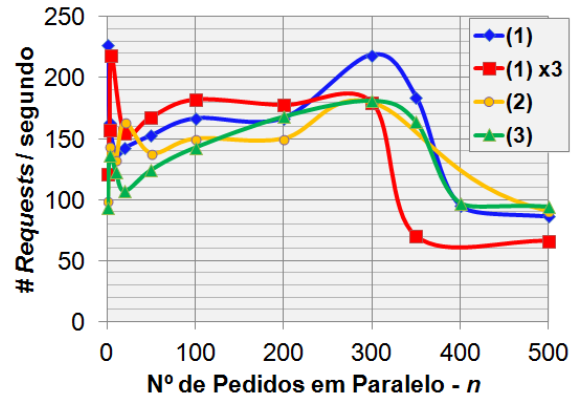


Figura 5.6: Performance da resposta do servidor aos pedidos efetuados à base de dados, em pedidos atendidos por segundo.

Esta distribuição de tempos reflete-se no gráfico dos tempos totais de resposta, apresentado na figura 5.5. Verifica-se que, até às já referidas três centenas de pedidos em simultâneo, o servidor consegue atender a sucessão de pedidos num intervalo de tempo inferior a cinco segundos, que se encontra dentro do intervalo mínimo de tempo correspondente ao cálculo de uma nova posição e não interfere com a normal execução do algoritmo. Caso a sobrecarga de pedidos ao servidor seja ainda maior, o comportamento da resposta passa a ser diferente para os casos apresentados: enquanto que a execução de pedidos paralelos com apenas uma instrução consegue ser respondida pelo servidor, numa relação de 550 a 600 pedidos em sete segundos, o tempo de resposta do servidor aumenta de forma substancial caso seja necessário que, em simultâneo, mais de 300 utilizadores necessitem das coordenadas geográficas de três sensores, de tal forma que 350 pedidos do género serão já atendidos num tempo médio de 14.98 segundos.

Este último cenário seria capaz de atrasar o cálculo de uma nova posição e colocar em causa o desempenho de todo o sistema, mas a inclusão na *TLSApp* de uma lista, onde são inseridas as coordenadas de todos os sensores uma vez conhecidos, permite que a mesma necessite de efetuar pedidos triplos à base de dados apenas de forma esporádica, o que diminui grandemente a probabilidade de se verificar um número tão elevado de pedidos triplos em paralelo. Além disso, numa visão experimental e minimalista do sistema será de esperar a existência de um número de pedidos em paralelo mais reduzido, pelo que a solução implementada se afigura como suficiente, ainda que possam existir picos de acesso em que os tempos de resposta sejam superiores aos tempos médios apresentados. Um aumento significativo do número de utilizadores, decorrente de uma progressão de nível comercial, deve contudo ser acompanhado de uma diferente configuração do servidor ou, no pior caso, da escolha de outra solução que garanta uma melhor performance.

Capítulo 6

Conclusões

A precisão dos sistemas de localização é uma temática que continua, ainda nos dias de hoje, a possuir amplas perspectivas de desenvolvimento futuro. O TLS, sistema desenvolvido na presente dissertação, procurou estabelecer-se como uma alternativa credível aos sistemas existentes, pela utilização de uma rede de sensores baseada na tecnologia *Bluetooth Low Energy*.

Os resultados obtidos pelo sistema dependem, em grande medida, do número de dispositivos transmissores instalados num espaço, sendo necessário que cada divisão se encontre equipada com pelo menos três transmissores para que se produzam resultados positivos. Nessas condições, a qualidade das estimativas é claramente superior em divisões amplas e/ou no centro dos espaços, pela maior facilidade que os sinais transmitidos pelos *tags* têm em atingir tais pontos, com níveis de precisão na maioria dos casos inferiores a 15% da dimensão do espaço. Em sentido contrário, os níveis de precisão obtidos nas extremidades do espaço não se revelaram satisfatórios, podendo facilmente ultrapassar uma margem de erro de 40%. Estes problemas ficam a dever-se sobretudo à irregular transmissão do sinal por parte dos dispositivos *SensorTag* e à receção do sinal por parte dos *smartphones Android* – cujo módulo recetor se encontra assimetricamente instalado, o que origina diferenças no sinal recebido consoante a direção de proveniência – mas também à existência de obstáculos, que atenuam fortemente o sinal transmitido e conduzem a uma assunção errada da distância que separa o transmissor do recetor e a uma percentagem demasiado elevada de estimativas invalidadas pelo algoritmo de localização.

A aplicação *Android TLSApp*, juntamente com a aplicação *web* que a complementa e permite alterar a disposição dos transmissores são instrumentos que podem ser extrapolados para outro tipo de sistemas com relativa facilidade, e o seu desenvolvimento revelou-se de manifesta utilidade. Ainda assim, comparando o TLS com os sistemas de localização em tempo real existentes no mercado e outras abordagens realizadas (revistas na secção 2.3), verifica-se que por muito que o sistema possua uma estrutura perfeitamente funcional, capaz de ser implementada recorrendo apenas a pequenos ajustes (o que não ocorre em boa parte das opções analisadas) e que os seus constituintes apresentem consumos energéticos bastante reduzidos, os níveis de precisão atingidos encontram-se num patamar inferior ao da maioria, pelo que é justo considerar-se que os objetivos da dissertação não foram atin-

gidos na sua plenitude. A abordagem seguida, que pretende aferir a distância entre dois pontos através da potência do sinal recebido está, pelos motivos referidos, longe de ser a mais eficiente, sendo aconselhável que no futuro se continuem a reunir esforços para tentar encontrar uma alternativa que não comprometa a principal vantagem deste sistema, a elevada escalabilidade.

6.1 Trabalho Futuro

No que ao trabalho realizado diz respeito, existem dois aspetos que devem ser tidos em conta num desenvolvimento futuro, a partir dos quais se podem obter resultados mais satisfatórios: um estudo aprofundado com vista à adoção de outro tipo de *tag*, cujo diagrama de radiação seja o menos direcional possível, e a utilização de um algoritmo de localização a três dimensões que tornaria a localização mais completa. A conjugação deste algoritmo tridimensional com um método que permitisse determinar a direção de transmissão e proveniência do sinal, quando transmitido e recebido, seria um complemento bastante importante no sentido de se obterem resultados mais positivos com a arquitetura traçada, já que permitiria relacionar diretamente o sinal recebido com o diagrama de radiação dos transmissores. Outra possibilidade, que obrigaria a alterações na arquitetura do sistema e a um planeamento detalhado, seria incluir no sistema o envio e receção de sinais por parte dos *tags* (que passariam a ser elementos transmissores e recetores) para aferir possíveis diferenças no RSSI obtido entre diferentes transmissões e, assim, retirar conclusões sobre as condições de propagação no meio, o que permitiria calcular a distância pela correlação destes valores com os RSSI recebidos pelo utilizador.

Como proposta de trabalho futuro conta-se ainda o aproveitamento dos dados do sistema GPS na aplicação *TLSApp*, como complemento ao sistema implementado, de forma a que um utilizador possa ser localizado em ambientes exteriores quando não se encontrar próximo de qualquer área coberta pelos *SensorTag*. Esta inclusão pode ser realizada sem grande dificuldade através da biblioteca *Android* existente para o efeito, sendo posteriormente necessário estipular as condições em que os dados de uma e outra fonte são utilizados. A conjugação dos dois sistemas na aplicação *Android* permitiria completar, em rigor, o *Sistema de Localização Global* pretendido para esta dissertação.

Bibliografia

- [1] GPS.gov - U.S. National Coordination Office for Space-Based Positioning, “GPS Accuracy.” [Online]. Available: <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> 2, 15
- [2] R. Bajaj, S. Ranaweera, and D. Agrawal, “GPS: location-tracking technology,” *Computer*, vol. 35, no. 4, pp. 92–94, 2002. 2
- [3] P. Barsocchi, S. Lenzi, S. Chessa, and G. Giunta, “Virtual Calibration for RSSI-Based Indoor Localization with IEEE 802.15.4,” in *2009 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, Jun. 2009, pp. 1–5. 5
- [4] H. Gerhaeuser and A. Loeffler, *Radio Frequency Identification from System to Applications*, M. I. B. Reaz, Ed. Erlangen, Germany: InTech, Jun. 2013. 6
- [5] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, “Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, vol. 3, no. 2, pp. 281–323, 2005. 8
- [6] P. Rong and M. Sichitiu, “Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks,” in *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, vol. 1. Reston, USA: IEEE, 2006, pp. 374–382. 8
- [7] ZEISS - Universität Siegen, “Satellite based position and attitude determination.” [Online]. Available: <http://www.zess.uni-siegen.de/home/das-zess/forschung/navigation.html> 8
- [8] R. Watson, D. Huang, and M. Rai, “Understanding the IEEE 802.11 ac,” 2013. [Online]. Available: <http://www.merunetworks.com/collateral/white-papers/wp-ieee-802-11ac-understanding-enterprise-wlan-challenges.pdf> 10
- [9] Y. Guo, S. Zhang, and D. Xio, “Overview of Wi-Fi Technology,” in *The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*. Paris, France: Atlantis Press, 2012, pp. 1293–1296. 10
- [10] Infowester, “Wi-Fi (IEEE 802.11),” 2013. [Online]. Available: <http://www.infowester.com/wifi.php> 10

- [11] S. Plosz, A. Farshad, M. Tauber, C. Lesjak, T. Rupprechter, and N. Pereira, "Security Vulnerabilities and Risks in Industrial Usage of Wireless Communication," in *19th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation*, Barcelona, Spain, 2014. 10
- [12] Y.-C. Cheng, Y. Chawathe, A. LaMarca, and J. Krumm, "Accuracy characterization for metropolitan-scale Wi-Fi localization," in *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSys '05*. New York, New York, USA: ACM Press, Jun. 2005, p. 233. 10, 11
- [13] C. Bisdikian, "An overview of the Bluetooth wireless technology," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 12, pp. 86–94, Dec. 2001. 11, 12
- [14] K. Shah and S. Patel, "Bluetooth Technology." [Online]. Available: <http://pt.slideshare.net/kashyapshah11/bluetooth-paperieee> 12
- [15] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology," *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 11 734–11 753, Aug. 2012. 12, 13, 26
- [16] K. Townsend, C. Cufi, Akiba, and R. Davidson, *Getting Started with Bluetooth Low Energy*, 1st ed., M. Loukides and B. Sawyer, Eds. O'Reilly Media, 2014. 13
- [17] R. Nilsson and B. Saltzstein, "Bluetooth Low Energy vs. Classic Bluetooth: Choose the Best Wireless Technology For Your Application," 2012. [Online]. Available: <http://www.medicalelectronicsdesign.com/article/bluetooth-low-energy-vs-classic-bluetooth-choose-best-wireless-technology-your-application> 13
- [18] C. Hocking, "The Beacon Experiments: Low-Energy Bluetooth Devices in Action," 2014. [Online]. Available: <http://java.dzone.com/articles/beacon-experiments-low-energy> 13
- [19] Radio-Electronics, "GSM: Global System for Mobile Communications Tutorial." [Online]. Available: http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/gsm-technical/gsm_introduction.php 13
- [20] J. G. Sempere and P. Kadionik, "An Overview of the GSM System," 2001. [Online]. Available: http://paginas.fe.up.pt/~mleitao/CMOV/Tecnico/GSM_Sempere.html 14
- [21] V. Otsason, A. Varshavsky, A. LaMarca, and E. de Lara, "Accurate GSM Indoor Localization," in *UbiComp 2005: Ubiquitous Computing*, ser. Lecture Notes in Computer Science, M. Beigl, S. Intille, J. Rekimoto, and H. Tokuda, Eds., vol. 3660. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 141–158. 14, 20
- [22] M. H. Abdel Meniem, A. M. Hamad, and E. Shaaban, "Relative RSS-based GSM localization technique," in *IEEE International Conference on Electro-Information Technology , EIT 2013*. IEEE, May 2013, pp. 1–6. 14

- [23] M. Ibrahim and M. Youssef, "CellSense: An Accurate Energy-Efficient GSM Positioning System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 286–296, Jan. 2012. 14
- [24] S. Gezici, G. Giannakis, H. Kobayashi, A. Molisch, H. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005. 15
- [25] U.S. National Wildfire Coordination Group, *National Interagency Incident Management System - Basic Land Navigation*. National Wildfire Coordinating Group, 2007. [Online]. Available: <http://www.nwcg.gov/pms/pubs/475/PMS475.pdf> 15, 16
- [26] University of Texas - Center for Space Research, "GPS Overview." [Online]. Available: http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gps.html 15
- [27] J. Li and M. Wu, "A Positioning Algorithm of AGPS," in *2009 International Conference on Signal Processing Systems*. IEEE, 2009, pp. 385–388. 16
- [28] J. LaMance, J. DeSalas, and J. Järvinen, "Innovation: Assisted GPS: A Low-Infrastructure Approach," *GPS World*, 2002. [Online]. Available: http://www.gpsworld.com/wp-content/uploads/2012/09/gpsworld_Innovation_0302.pdf 16
- [29] Statista, "GPS - Market Statistics & Industry Facts." [Online]. Available: <http://www.statista.com/stats/148382/gps> 16
- [30] NIS-GLONASS, "GLONASS: Technical Description." [Online]. Available: http://www.nis-glonass.ru/en/glonass/technical_descript/index.php 17
- [31] RIA Novosti, "GLONASS: Dispelling the myths around Russia's GPS," Moscow, Russia, Jan. 2014. [Online]. Available: http://rbth.co.uk/science_and_tech/2014/01/10/glonass_dispelling_the_myths_around_russias_gps_33183.html 17
- [32] GPSWorld, "Test Shows Galileo Increases Accuracy of Location-Based Services," *GPSWorld*, May 2014. [Online]. Available: <http://gpsworld.com/test-shows-galileo-increases-accuracy-of-location-based-services/> 17
- [33] European Global Navigation Satellite Systems Agency, "Galileo: Programme." [Online]. Available: <http://www.gsa.europa.eu/galileo/programme> 17
- [34] P. Bahl and V. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, vol. 2. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2000, pp. 775–784. 17

- [35] Y.-L. Lai and J. Cheng, "A Cloud-Storage RFID Location Tracking System," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 7, pp. 1–4, Jul. 2014. 18
- [36] A. Cavallini, "iBeacon Bible 2.0," Gaia-Matrix, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <http://meetingofideas.files.wordpress.com/2013/12/ibeacons-bible-1-0.pdf> 18
- [37] G. Narcisi, "Motorola unveils iBeacon-based indoor positioning technology," 2014. [Online]. Available: <http://searchnetworking.techtarget.com/news/2240220193/Motorola-unveils-iBeacon-based-indoor-positioning-technology> 18
- [38] M. Hazas and A. Hopper, "Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 536–547, May 2006. 19
- [39] P. Steggles and S. Gschwind, "The Ubisense Smart Space Platform," in *Pervasive Computing - The 3rd International Conference, PERVASIVE 2005*. Munich, Germany: Springer, 2005, pp. 73–76. 19
- [40] C. Zhang, J. Luo, and J. Wu, "Poster abstract: MaWi: A hybrid Magnetic and Wi-Fi system for scalable indoor localization," in *IPSN-14 Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. Berlin, Germany: IEEE, Apr. 2014, pp. 275–276. 20
- [41] M. Ibrahim and M. Youssef, "A Hidden Markov Model for Localization Using Low-End GSM Cell Phones," in *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Kyoto, Japan: IEEE, Jun. 2011, pp. 1–5. 20
- [42] D. L. Hall and S. A. H. McMullen, *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*, 1st ed. Artech House, 2004. 21, 23
- [43] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, and T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software*, 1st ed. John Wiley & Sons, 2004. 21
- [44] J. A. Lawton, R. J. Jesionowski, and P. Zarchan, "Comparison of Four Filtering Options for a Radar Tracking Problem,," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, no. 4, pp. 618–623, 1998. 21, 24
- [45] M. I. Ribeiro and P. Lima, "Introduction to Kalman Filtering," Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, Tech. Rep., 2008. [Online]. Available: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572000299/Cap4-Kalman-Filter\(export\).pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572000299/Cap4-Kalman-Filter(export).pdf) 21
- [46] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," University of North Carolina, Chapel Hill, USA, Tech. Rep., Nov. 1995. [Online]. Available: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf 22, 23

- [47] R. Faragher, “Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation [Lecture Notes],” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 29, no. 5, pp. 128–132, Sep. 2012. 22
- [48] ATI Courses, “Kalman Filter Derivation.” [Online]. Available: http://www.aticourses.com/kalman_filter.pdf 22
- [49] D. Tenne and T. Singh, “Optimal Design of α - β -(γ) Filters,” in *American Control Conference 2000*. Chicago, USA: Center for Multisource Information Fusion, State University of New York, 2000. 23
- [50] C. F. Asquith, *Weight Selection in First-Order Linear Filters*, 1st ed. Defense Technical Information Center, Jul. 1969. 24
- [51] D. E. Mayiatis, “Comparison of an Alpha-Beta and Kalman Filter in Track While Scan Radars,” Master Thesis, Naval Postgraduate School, 1979. 24
- [52] Texas Instruments, “CC2541 - SimpleLink Bluetooth Smart and Proprietary Wireless MCU - Technical Documents.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/CC2541/technicaldocuments> 26, 27, 28
- [53] 000webhost, “000webhost: Free Web Hosting with PHP, MySQL and Website Builder.” [Online]. Available: <http://www.000webhost.com/> 30
- [54] Digital Ocean, “SQLite vs MySQL vs PostgreSQL: A Comparison Of Relational Database Management Systems,” 2014. [Online]. Available: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/sqlite-vs-mysql-vs-postgresql-a-comparison-of-relational-database-management-systems> 30
- [55] D. Espírito Santo, “Google Indoor Maps chega a Portugal,” Porto, Portugal, Jan. 2015. [Online]. Available: http://www.jn.pt/PaginaInicial/Tecnologia/Interior.aspx?content_id=4339862 31
- [56] FMEpedia, “Calculating accurate length in meters for latitude, longitude coordinate systems,” 2013. [Online]. Available: http://fmepedia.safe.com/articles/How_To/Calculating-accurate-length-in-meters-for-lat-long-coordinate-systems 39
- [57] S. Dutch, “Converting UTM to Latitude and Longitude,” University of Wisconsin, Green Bay, USA, Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: <http://www.uwgb.edu/dutchs/UsefulData/UTMFormulas.HTM> 39
- [58] ECMA International, “Introducing JSON.” [Online]. Available: <http://json.org/> 42
- [59] LM Technologies, “LM506 Bluetooth 4.0 Dual-Mode SMART-Ready (BLE) USB Adapter.” [Online]. Available: <http://lm-technologies.com/wireless-adapters/lm506-class-1-bluetooth-4-0-usb-adapter/> 45

- [60] Texas Instruments, “Application Note: Small Size 2.4 GHz PCB antenna.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/swra117d/swra117d.pdf> 57
- [61] A. Rocha, “Propagação de Ondas Electromagnéticas,” Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, Tech. Rep., 2011. 62